

Relacion entre el tamaño de lote de transferencia y el desempeño de un sistema de manufactura tipo “Flow-Shop”

MYRIAM LEONOR NIÑO LÓPEZ

*Doctora en Administración y Dirección de Empresas
Universidad Industrial de Santander
myleni@uis.edu.co*

EDWIN ALBERTO GARAVITO HERNÁNDEZ

*Candidato a Magister en Ingeniería Industrial
Universidad Industrial de Santander
garavito@uis.edu.co*

GLADYS ANDREA GALEANO RODRÍGUEZ

*Ingeniera Industrial
Universidad Industrial de Santander
andrea_galeanorodriguez@hotmail.com*

Fecha recibido: 05/10/2011

Fecha de aprobación: 15/12/2011

RESUMEN

Esta investigación utiliza el dimensionado de lotes como una estrategia que complementa la función de programación de operaciones en las empresas. Se evalúa con base en las medidas de eficacia makespan y mean flow time, el desempeño de un sistema productivo cuando se utilizan diferentes tamaños de lote de transferencia. El diseño experimental aplicado incluye la política de tamaño de lote de transferencia, el nivel de demanda agregada y la mezcla de productos, lo cual da origen a 192 casos de estudio que se representaron mediante un modelo de Programación Lineal Entera Mixta y se solucionaron con GAMS, utilizando CPLEX como optimizador. El análisis estadístico mostró que la utilización de lotes de transferencia mejora el desempeño del sistema productivo y que debido a la influencia de los tiempos de preparación, la selección del tamaño de lote de transferencia más conveniente depende de la cantidad de productos fabricados.

PALABRAS CLAVE: Programación de operaciones, flow shop, lote de proceso, lote de transferencia, programación lineal entera mixta.

ABSTRACT

This research uses batch sizing as a strategy that complements machine scheduling in the companies. The objective is analyze the flow shop production system behavior when it uses different batch transfer size, under the performance measures makespan and mean flow time. The experimental design includes the transfer batch size policy, the demand level and the mix products. It results in 192 different analysis situations; these were represented under a mixed integer programming formulation and then were solved in GAMS, using CPLEX as optimizer. Results indicate that use transfer batch improve the production system performance. However, by the setup influence, select the transfer batch size more appropriate depends of the amount of products made.

KEYWORDS: Machine scheduling, flow shop, process batch, transfer batch, mixed integer programming.

1. INTRODUCCIÓN

El entorno competitivo actual se caracteriza por cambios frecuentes en las exigencias de los clientes, las cuales son cada vez más particulares, originando niveles de demanda inestables y una vasta diversidad de productos con diferencias significativas en sus características de procesamiento. Para poder hacer frente a este entorno, las empresas requieren de sistemas flexibles y eficientes que estén en capacidad de procesar volúmenes variables de una gran variedad de productos con altos estándares de desempeño en términos de calidad y costos. Adicionalmente, la velocidad en la entrega y el cumplimiento se posicionan en la actualidad como factores de vital importancia en la satisfacción del cliente.

Una de las actividades con mayor incidencia en el tiempo de entrega de los productos es la Programación de Operaciones, dado que a través de esta función se establece la secuencia de paso de todos los productos a través de los recursos del sistema productivo, de acuerdo con diferentes criterios de prioridad. Por esta razón, el desarrollo y aplicación de estrategias para el diseño de programas eficientes se ha convertido en un tema importante de estudio. Entre las diferentes estrategias consideradas, se encuentra la diferenciación entre lotes de proceso y lotes de transferencia, dado que en muchas situaciones, una buena secuencia de operaciones puede mejorarse considerablemente con una política de tamaño de lote de transferencia conveniente.

Debido a la heterogeneidad en las características de procesamiento de los productos, los centros de trabajo deben ajustarse cada vez que finaliza la fabricación de una clase de producto e inicia otra, razón por la cual, en los sistemas de producción convencionales, las piezas que pertenecen a un producto específico se agrupan en lotes y se fabrican consecutivamente en cada centro de trabajo, utilizando una única preparación. El grupo de productos conformado se conoce como Lote de Proceso. El principal criterio para determinar el tamaño óptimo del lote de proceso es el tiempo de preparación de las máquinas. En consecuencia, cuando las preparaciones son complejas se busca que el tamaño del lote de proceso sea grande para fabricar más productos entre preparaciones sucesivas y así no ocupar la capacidad de las máquinas en dicha actividad. Sin embargo, aún con una buena secuencia, esta forma de operación puede retrasar la fabricación de los productos.

Inicialmente, un incremento en el tamaño del lote de proceso mejora el flujo de los productos a través del

sistema debido a la reducción en la frecuencia de los cambios, pero, cuando el lote es muy grande, los tiempos de flujo comienzan a incrementarse nuevamente porque el traslado de los productos se realiza sólo cuando se completa la fabricación de todo el lote, por consiguiente, cada pieza permanece en el centro de trabajo esperando a ser procesada o esperando a que las demás unidades que conforman el lote sean procesadas, lo cual genera largas filas de espera, retrasos en la salida de los productos y altos niveles de inventario.

Reducir los tiempos de preparación de las máquinas permitiría operar lotes de proceso más pequeños, pero en muchas situaciones, por costos o restricciones tecnológicas, esto no es posible. Otra alternativa, es optar por transferir a la siguiente estación un grupo de productos inferior al lote de proceso. Este grupo de productos se conoce como Lote de Transferencia, y representa el número de piezas que se acumulan en una estación antes de ser transferidas a la siguiente.

La hipótesis que se plantea es que la división de un lote de proceso en diferentes lotes de transferencia, reduce significativamente el tiempo de permanencia de los productos en el sistema y agiliza el ritmo de producción. Si se comprueba la veracidad de esta hipótesis, la utilización de lotes de transferencia sería una decisión acertada para compensar altos tiempos de preparación, sin retrasos en el movimiento de los productos, ni largas filas de espera, porque, con una sola preparación en la máquina para todos los lotes de transferencia que pertenecen al mismo lote de proceso, es posible mantener el movimiento continuo de los productos y reducir los niveles de inventario. A esta práctica se le conoce en la literatura de programación de operaciones como “lotsplitting”, “lotstreaming” ó “lotsizing” y ha sido clasificada como una de las tendencias actuales en programación de operaciones.

Aunque lo ideal sería trasladar los productos de uno en uno, el tamaño óptimo del lote de transferencia depende del sistema de transporte de materiales, porque, al aumentar la frecuencia de movimiento de los productos, se aumenta la carga en los mecanismos de transporte, y si éstos no cuentan con la capacidad suficiente para hacer frente a mayores exigencias, los beneficios alcanzados mediante la aplicación de lotes de transferencia se verían afectados por mayores costos en el manejo de los materiales, retrasos en el traslado de los productos y dificultades para el control del sistema productivo.

El objetivo de la investigación se centró en comprobar estadísticamente el efecto de la utilización de lotes

de transferencia en dos medidas de desempeño tradicionales: el makespan y el mean flow time, utilizando como referencia un sistema productivo tipo flow shop¹. Además, en el estudio se incluyeron tiempos de preparación y algunas consideraciones relacionadas con el manejo y control de materiales.

Este estudio complementa las investigaciones realizadas hasta el momento, porque considera un sistema productivo de mayor complejidad y comprueba el efecto del fraccionamiento de los lotes de proceso en las medidas de desempeño, mediante pruebas estadísticas formales. Además, los hallazgos obtenidos son una base para estimular aplicaciones de este tipo en sistemas de manufactura reales.

2. ANTECEDENTES

La mayoría de investigaciones realizadas en los últimos cuarenta años en el área de administración de operaciones se relacionan principalmente con el problema de programación. Los estudios que consideran la diferenciación entre lotes de proceso y lotes de transferencia como una variante al problema básico, siguen dos enfoques diferentes. En el primero, el objetivo es determinar el efecto del fraccionamiento de los lotes de proceso sobre diferentes medidas de desempeño del sistema productivo, mientras que los estudios que siguen el segundo enfoque se centran en el desarrollo de algoritmos para secuenciar los lotes de transferencia a través de los recursos del sistema, determinando simultáneamente su tamaño, de tal forma que se optimice una medida de desempeño específica.

La utilización de lotes de transferencia fue un elemento importante en los estudios de Jacobs y Bragg [1]. Bajo el concepto de "Lotes Repetitivos", demostraron que la utilización de un tamaño de lote de transferencia inferior al del lote de proceso, mejora los resultados obtenidos con una buena secuencia de operaciones. Para evaluar el impacto que tiene en el flujo de los productos la utilización de lotes de transferencia, desarrollaron un algoritmo para la secuenciación de lotes repetitivos de trabajos, utilizando como medidas de desempeño el tiempo promedio de flujo y su variabilidad. Sus resultados sugieren que el tiempo de permanencia de los productos en el sistema puede reducirse mediante el fraccionamiento de los lotes de proceso, siendo más conveniente su aplicación en sistemas de manufactura con altos volúmenes de demanda.

¹ En el anexo al presente artículo se muestra el sistema productivo analizado.

Karmarkar [2] analizó un modelo de colas en el que sólo se consideraban los lotes de proceso para determinar la secuencia.

Los primeros resultados formales en el desarrollo de algoritmos para secuenciar los lotes de transferencia a través de los recursos del sistema y determinar su tamaño óptimo, fueron presentados en 1989 por Potts y Baker [3], quienes trataron el caso de un solo producto en sistemas con dos y tres máquinas.

Más tarde, Kropp y Smunt [4] investigaron mediante un modelo matemático de programación cuadrática, el desempeño de diferentes tamaños de lote de transferencia de un solo producto en un sistema productivo con varias máquinas. Encontraron que el número de sublotes utilizado, el tiempo de preparación y el número de máquinas tienen un efecto importante en el tiempo de permanencia de los productos en el sistema.

En 1990 Baker y Pike [5] desarrollaron un método eficiente para programar dos lotes de transferencia de un solo producto en m máquinas, minimizando el makespan. A manera de conclusión, Baker y Pike insisten en la necesidad de estudiar la programación de más de un producto para incluir en el análisis los tiempos de preparación de las máquinas.

En 1992, Vickson y Alfredsson [6] consideraron la programación de múltiples productos en dos y tres máquinas con tamaños de lote de transferencia unitarios, encontrando que dicho tamaño es el óptimo cuando los tiempos de preparación son insignificantes.

En 1996, Benjaafar [7] amplió el modelo propuesto por Karmarkar, para estudiar la relación entre el tamaño de lote de transferencia y el tiempo de suministro de un solo producto, concluye que la utilización de lotes de transferencia tiene un efecto significativo en el desempeño del sistema, dado que mejora el flujo de las piezas y minimiza las esperas.

En ese mismo año, Smunt, Buss y Kropp [8], realizaron uno de los estudios más completos en el tema de dimensionado de lotes, porque, a diferencia de investigaciones posteriores, en este estudio se analizó el impacto del fraccionamiento de lotes en sistemas de manufactura dinámicos y estocásticos. Encontraron que el efecto del número de lotes de transferencia en las medidas de desempeño del sistema es más dramático cuando los tiempos de preparación son largos y el volumen de producción es elevado.

Pocos estudios se han desarrollado en ambientes de producción diferentes a los sistemas tipo flow shop, entre ellos, se destaca el realizado por Dauzère-Pérès y Laserre [9] en 1997, el cual utilizó como referencia un sistema productivo tipo job shop.

Drexel y Kimms [10] construyeron un estado del arte sobre el problema del dimensionado de lotes en la programación de operaciones, concluyendo la necesidad de mayor investigación en el área.

En 1998, Ruben y Mahmoodi [11] investigaron el desempeño de diferentes reglas de secuenciación cuando se utilizan lotes de transferencia en sistemas productivos que cuentan con uno o más recursos cuello de botella. Concluyeron que fraccionar los lotes de proceso en un centro de trabajo que no es cuello de botella, contribuye a mejorar la efectividad del sistema, porque, aunque se aumenta el número de preparaciones, estos recursos tienen capacidad adicional y no se ven afectados.

En 1999, Langevin y Riopel [12] desarrollaron un método para determinar en diferentes escenarios productivos, el tamaño de lote de transferencia que minimiza el costo total de producción. El modelo se centró en cuatro tipos de costos relacionados con las decisiones de loteo: el costo de manejo de materiales, el costo de preparación de los contenedores en los que se transportan los productos, el costo de oportunidad de los inventarios en proceso y el costo de utilización de las máquinas. Se comparó el costo total de producción que se obtiene al utilizar el tamaño de lote de transferencia generado por el modelo con el costo de utilizar lotes de transferencia unitarios y no fraccionar el lote de proceso, encontrando que el método propuesto en el estudio proporciona los costos totales más bajos.

En el 2000, Kalir y Sarin [13] confirmaron los beneficios que proporciona el uso de lotes de transferencia, evaluando un sistema productivo flow shop con respecto a tres medidas de desempeño comunes: el makespan, el mean flow time y el inventario promedio. Dado que asumieron despreciables los tiempos de preparación, concluyeron la necesidad de evaluar en trabajos de investigación futuros los efectos de los tiempos de preparación y transporte.

Stadtler [14] propone una heurística para resolver el problema dinámico de loteo en una configuración productiva multiproducto, con uno o múltiples recursos limitación y tiempos de preparación. Los modelos

utilizados son formulados a través de la programación lineal entera mixta, se concluye que la heurística propuesta brinda buenas soluciones.

En el 2003, Suerie y Stadtler [15] formulan un modelo en programación entera en el cual incorporan el problema de loteo y lo solucionan a través de una heurística de descomposición; múltiples pruebas computacionales les permite afirmar que su enfoque presenta un desempeño superior a otras propuestas existentes.

Quadt y Kuhn [16] presentan una investigación considerando los problemas de programación y loteo en una línea de producción de flujo flexible. El objetivo es encontrar los tamaños de lote y el programa factible que le permita minimizar las preparaciones de máquina, los costos de mantener inventarios y reprocesos. Formulan un enfoque de solución que incorpora la interdependencia entre las decisiones de programación y loteo y lo prueban en una empresa de semiconductores.

En 1996, Caballero [17] evaluó el impacto del tamaño de lote de transferencia en la programación de operaciones de un sistema productivo tipo flow shop. En su análisis, utilizó cuatro tamaños de lote de transferencia: igual a uno, igual al lote de proceso, igual al lote de proceso con anticipación de la preparación de las máquinas e igual a la mitad del lote de proceso. El desempeño del sistema fue analizado en términos de dos medidas de eficacia: el makespan y el mean flow time. La autora concluye que cuando se utilizan lotes de transferencia unitarios, se reducen aproximadamente en un 50% los valores del makespan y del mean flow time. En los casos de estudio analizados, no se fijó la demanda agregada de los productos, por lo tanto, al cambiar la demanda total entre un caso y otro, los resultados no sólo contienen el efecto del tamaño de lote de transferencia, también están influenciados por la cantidad de productos fabricados, razón por la cual, es posible que parte de las diferencias atribuidas al efecto del tamaño de lote de transferencia estén relacionadas también con la variación en la demanda total, lo cual, invalida las conclusiones del estudio.

Uno de los trabajos más recientes en el tema de la programación de operaciones con fraccionamiento de lotes para un solo producto, es el de Biskup y Feldmann [18], el cual utiliza un modelo de Programación Entera Mixta para secuenciar los sublotes, considerando cualquier número de máquinas y permitiendo que el tamaño de cada sublote varíe entre las diferentes estaciones de trabajo.

En ese mismo año, Marimuthu, Ponnambalam y Jawahar [19], presentan los resultados de una investigación en donde utilizaron las metaheurísticas de recocido simulado y búsqueda tabú para encontrar la secuencia óptima de los sublotes, utilizando como criterios de desempeño el makespan y el mean flow time.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada es posible ratificar la vigencia que tiene el problema de investigación de la programación de operaciones junto con el problema de loteo y la necesidad de que se desarrollen estudios en diversas configuraciones productivas que contribuyan ampliar el conocimiento disponible sobre el tema.

3. METODOLOGIA

Para el desarrollo de la investigación se definieron 4 etapas: modelización del sistema productivo, determinación de los parámetros del modelo, diseño experimental y solución. A continuación se detallan las características de cada una de ellas.

3.1. Modelización del sistema productivo

Para el desarrollo de la investigación se utilizó una configuración productiva que se planteó en un material de formación del Instituto Avraham Y. Goldratt [20]. Dicha configuración corresponde a un flow-shop híbrido de 4 etapas y contempla la elaboración de 8 productos. Se presentan los tiempos de preparación de las máquinas y los tiempos de cada una de las operaciones. Se seleccionó para la investigación por considerarse que refleja en buena medida las características propias de un sistema productivo de la actualidad. Ver anexo.

La programación de operaciones de este sistema productivo se realizó mediante un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (PLEM) propuesto por Niño [21]. Este modelo es un sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas, cuya solución permite determinar la secuencia de operaciones que optimiza las medidas de desempeño consideradas.

El modelo se define básicamente a través de una función objetivo para cada medida de eficacia y dos tipos de restricciones: las restricciones de secuencia y las restricciones de interferencia.

3.1.1 Función Objetivo

i. Makespan

La función objetivo para la variable respuesta makespan se representó mediante una restricción para la última operación de cada trabajo.

$$X(i, z, k) + PL(i, z, k) \leq T \quad (1)$$

X : Variable tiempo de inicio de la operación

i : Trabajo

z : Última operación de un trabajo

k : Máquina dónde se ejecuta la operación precedente

PL Parámetro tiempo de proceso de un lote, incluido tiempo de preparación

T : Variable que representa la terminación del proceso

Entonces, la variable a minimizar es T , cuyo valor representa el makespan óptimo.

ii. Mean Flow Time (FF)

Para esta variable respuesta se formuló de igual forma una restricción para la última operación de cada trabajo, modificando la variable T en función del trabajo que se realiza.

$$X(i, z, k) + PL(i, z, k) \leq T(i) \quad (2)$$

En este caso, como se minimiza la suma de los tiempos de finalización de todos los trabajos, la función objetivo a optimizar es:

$$FF = \sum T(i) \rightarrow \text{mín.} \quad (3)$$

3.1.2 Restricciones de Secuencia

Se formuló este tipo de restricciones entre operaciones sucesivas para asegurar el cumplimiento del orden tecnológico establecido por la ruta de los productos. Según la cantidad de máquinas disponibles para la ejecución de las operaciones precedente y siguiente, las restricciones de secuencia se clasifican en Tipo I, Tipo II y Tipo III.

i. Restricciones de Secuencia Tipo I

Representan la secuencia entre dos operaciones que se realizan en máquinas de las que se tiene sólo una

unidad. Estas restricciones se escriben como indica la ecuación 4.

$$X(i, j, k) + TT(i, j, k) \leq X(i, d, l) \quad (4)$$

j : Operación precedente

d : Operación siguiente

l : Máquina dónde se ejecuta la operación siguiente

TT : Tiempo mínimo antes del inicio

ii. Restricciones de Secuencia Tipo II

Se aplican cuando la operación precedente se realiza en una máquina de la que hay dos unidades disponibles, y la operación siguiente en una máquina de la que se tiene sólo una unidad. Se escriben según las ecuaciones 5, 6 y 7. La ecuación 9 asegura que sólo se utilice una de las dos unidades disponibles de la máquina en donde se ejecuta la operación precedente.

$$X(i, j, k_1) + TT(i, j, k_1) \leq X(i, d, l) + M \cdot (1 - Y(i, j, k_1)) \quad (5)$$

$$X(i, j, k_2) + TT(i, j, k_2) \leq X(i, d, l) + M \cdot (1 - Y(i, j, k_2)) \quad (6)$$

$$Y(i, j, k_1) + Y(i, j, k_2) = 1 \quad (7)$$

k_1 : Máquina donde es posible ejecutar la operación precedente

k_2 : Máquina donde es posible ejecutar la operación precedente

Y : Variable binaria que si vale 1 señala que la operación se ejecuta en esa máquina y si vale 0 en la otra.

M : Número suficientemente grande para permitir que sólo una de las desigualdades se active.

iii. Restricciones de Secuencia Tipo III

Se aplican cuando la operación siguiente se realiza en una máquina de la que hay dos unidades disponibles, y la operación precedente en una máquina de la que se tiene sólo una unidad. Las desigualdades 8, 9 y 10 representan esta clase de restricción.

$$X(i, j, k) + TT(i, j, k) \leq X(i, d, l_1) + M \cdot (1 - Y(i, d, l_1)) \quad (8)$$

$$X(i, j, k) + TT(i, j, k) \leq X(i, d, l_2) + M \cdot (1 - Y(i, d, l_2)) \quad (9)$$

$$Y(i, d, l_1) + Y(i, d, l_2) = 1 \quad (10)$$

l_1 : Máquina donde es posible ejecutar la operación siguiente

l_2 : Máquina dónde es posible ejecutar la operación siguiente

Al igual que la ecuación 7, la ecuación 10 asegura que sólo se utilice una de las dos unidades disponibles de la máquina en donde se ejecuta la operación siguiente.

3.1.3 Restricciones de Interferencia

Se formuló este tipo de restricciones entre operaciones que se realizan en la misma máquina para asegurar que éstas no se programen simultáneamente, porque, cada máquina sólo puede procesar una operación al tiempo. Según la cantidad de máquinas, las restricciones de interferencia se clasifican en Tipo I y Tipo II.

i. Restricciones de Interferencia Tipo I

Representan la interferencia que ocurre entre dos operaciones que utilizan una máquina de la cual hay disponible sólo una unidad. Existen ligaduras disyuntivas entre dos trabajos cualquiera, i, r que se pueden representar por las desigualdades 11 y 12.

$$X(i, j, k) - X(r, d, k) \geq PL(r, d, k) \quad (11)$$

O bien

$$X(r, d, k) - X(i, j, k) \geq PL(i, j, k) \quad (12)$$

i : Trabajo

r : Trabajo

j : Operación

d : Operación

k : Máquina donde se realizan las operaciones j, d .

Ese tipo de ligadura se trata mediante un modelo lineal con una variable binaria $Z(i, j, r, d, k)$, que vale 1 si el trabajo (i, j) precede al trabajo (r, d) en la máquina k , no necesariamente de forma inmediata y 0 en caso contrario. En consecuencia, se deben formular las desigualdades 13 y 14.

$$M * Z(i, j, r, d, k) + X(i, j, k) - X(r, d, k) \geq PL(r, d, k) \quad (13)$$

$$M * (1 - Z(i, j, r, d, k)) + X(r, d, k) - X(i, j, k) \geq PL(i, j, k) \quad (14)$$

ii. Restricciones de Interferencia Tipo II

Representan la interferencia que ocurre entre dos operaciones que utilizan una máquina de la cual hay disponibles dos unidades. Para verificar la existencia de interferencia, se utiliza una variable binaria $W(i, j, r, d, k)$ que vale 1 si las operaciones se ejecutan en la misma unidad de un tipo de máquina y 0 en caso contrario.

La condición lógica:

$$Y(i, j, k_1) = 1 \wedge Y(r, d, k_1) = 1 \leftrightarrow W(i, j, r, d, k_1) = 1$$

Se representa por medio de las desigualdades 15, 16 y 17.

$$-Y(i, j, k) + W(i, j, r, d, k) \leq 0 \quad (15)$$

$$-Y(r, d, k) + W(i, j, r, d, k) \leq 0 \quad (16)$$

$$Y(i, j, k) + Y(r, d, k) - W(i, j, r, d, k) \leq 1 \quad (17)$$

La formulación de las restricciones de interferencia depende del valor que tome la variable binaria $W(i, j, r, d, k)$. Si vale 1 hay interferencia y se deben formular las restricciones para dicho par de operaciones, pero, si vale 0, no existe interferencia, y por lo tanto, no es necesario formular restricciones para ese par de operaciones. Esta situación se plantea a través de las desigualdades 18, 19, 20 y 21.

$$X(i, j, k) - X(r, d, k) + A \cdot U(i, j, r, d, k) \geq PL(r, d, k) + A \quad (18)$$

$$X(i, j, k) - X(r, d, k) - (M+B) \cdot U(i, j, r, d, k) \leq PL(r, d, k) - B \quad (19)$$

$$X(r, d, k) - X(i, j, k) + A \cdot V(i, j, r, d, k) \geq PL(i, j, k) + A \quad (20)$$

$$X(r, d, k) - X(i, j, k) - (M+B) \cdot V(i, j, r, d, k) \leq PL(i, j, k) - B \quad (21)$$

U : Variable binaria para indicar si la restricción se satisface

V : Variable binaria para indicar si la restricción se satisface

M : Número suficientemente grande para forzar a que una restricción sea activa

A : Número suficientemente pequeño

B : Valor de tolerancia pequeño a partir del cual se considera que las restricción se rompe.

Además de las restricciones anteriores, es necesario formular dos restricciones más para las variables binarias, con el fin de garantizar que sólo se active un par de las cuatro restricciones de interferencia planteadas anteriormente.

$$W(i, j, r, d, k) + U(i, j, r, d, k) + V(i, j, r, d, k) \leq 2 \quad (22)$$

$$W(i, j, r, d, k) - U(i, j, r, d, k) - V(i, j, r, d, k) \leq 0 \quad (23)$$

3.2 Parametrización del modelo

Para cada uno de los 192 casos de estudio, se especificaron en el modelo matemático los parámetros *Tiempo de proceso de lote* (PL) y *Tiempo mínimo antes del inicio* (TT).

- **Tiempo de proceso de Lote PL**

Este parámetro representa el tiempo que demora la fabricación de todo el lote de proceso en cada una de las operaciones, incluyendo el tiempo de preparación de la máquina. Se calculó multiplicando el tamaño de lote de proceso por el tiempo de procesamiento unitario en cada operación y sumando a este valor el tiempo

de alistamiento de la máquina en la que se realiza la operación.

- **Tiempo mínimo antes del inicio TT**

Un supuesto común en los problemas de programación de operaciones es no considerar montajes o particiones de lotes, pero, al utilizar lotes de transferencia es posible relajar dicho supuesto mediante el cálculo de parámetros adecuados. En este caso, el parámetro TT permite modificar las restricciones de secuencia y representar cada una de las cuatro políticas de operación, debido a que su valor define el instante en el que el lote de transferencia pasa a la siguiente estación.

Como hay operaciones precedentes que tienen dos operaciones siguientes, se utilizó el parámetro TT_2 para diferenciar las restricciones de secuencia que tienen la misma operación precedente. Las operaciones que son punto de divergencia son O_2, O_3, O_5, O_6, O_8 y O_{10} .

A continuación, se explica el cálculo del parámetro TT para cada una de las políticas de operación consideradas.

i. Lote de Transferencia Igual al Lote de Proceso

Como muestra la **Figura 1**, con esta política de operación, el tiempo de inicio más temprano posible de la operación siguiente es equivalente al parámetro PL de la operación precedente.

$$TT = PL_{PRECEDENTE} \quad (24)$$

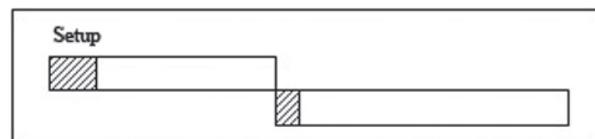


Figura 1. Lote de transferencia igual al lote de proceso

ii. Lote de Transferencia igual al lote de proceso, anticipando la preparación de las máquinas.

Como se permite anticipar la preparación de la máquina en la operación siguiente, su tiempo de inicio más temprano es igual al tiempo de procesamiento de todo el lote en la operación precedente menos el tiempo de preparación de la máquina en la que se ejecuta la operación siguiente. La ecuación 25 muestra la forma de cálculo del parámetro TT con la segunda política de operación

$$TT = PL_{PRECEDENTE} - SETUP_{SIGUIENTE} \quad (25)$$

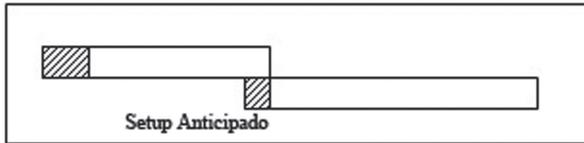


Figura 2. Anticipación del tiempo de preparación

Como las políticas 3 y 4 permiten el traslape de operaciones consecutivas, es necesario identificar dos situaciones diferentes para el cálculo del parámetro TT. En la primera, el parámetro PL de la operación siguiente es mayor que el parámetro PL de la operación precedente. Por el contrario, en la segunda, el parámetro PL de la operación siguiente es menor que el parámetro PL de la operación precedente.

iii. Lote de transferencia igual a medio lote de proceso

Situación 1

El tiempo de inicio más temprano de la operación siguiente, como muestra la ecuación 26, es cuando se ha procesado por completo la primera mitad del lote de proceso en la operación precedente, menos el tiempo de alistamiento de la máquina en donde se ejecuta la operación siguiente. La secuencia de operaciones para esta situación se muestra en la **Figura 3**.

$$TT = \frac{PL_{PREC} - SETUP_{PREC}}{2} + SETUP_{PREC} - SETUP_{SIG} \quad (26)$$

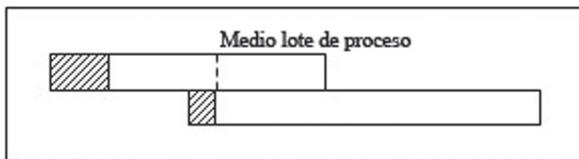


Figura 3. Lote de transferencia igual a medio lote de proceso

Situación 2

Como el parámetro PL de la operación siguiente es menor que el de la operación precedente, se debe garantizar que la elaboración de la última pieza en la operación siguiente comience cuando en la operación precedente se haya terminado todo el lote. La forma de cálculo que lo garantiza se muestra en la ecuación 27, donde P_{siguiente} corresponde al tiempo unitario de la operación siguiente.

$$TT = PL_{PRECEDENTE} + P_{SIGUIENTE} - PL_{SIGUIENTE} \quad (27)$$

La **Figura 4** muestra la secuencia de operaciones para la situación descrita.

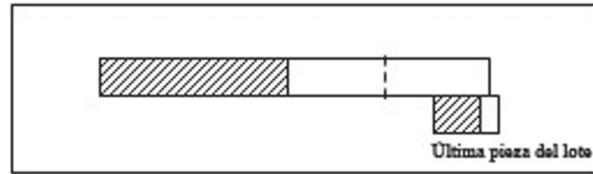


Figura 4. Lote de transferencia igual a medio lote de proceso

iv. Lote de transferencia unitario

Situación 1

Cuando se utilizan lotes de transferencia unitarios y el tiempo de proceso de lote en la operación siguiente es mayor que en la operación precedente, se debe garantizar que la primera unidad del lote empiece a ser procesada en la operación siguiente sólo cuando haya terminado su proceso en la operación precedente. Por eso, el tiempo de inicio más temprano de la operación precedente, se puede representar mediante la ecuación 28, donde P_{precedente} corresponde al tiempo unitario de la operación anterior.

$$TT = SETUP_{PRECEDENTE} + P_{PRECEDENTE} - SETUP_{SIGUIENTE} \quad (28)$$

La **Figura 5** muestra la secuencia de operación para la situación descrita.

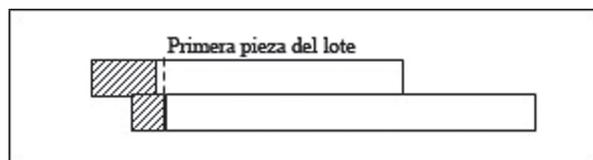


Figura 5. Lote de transferencia unitario

Situación 2

Como el tiempo de proceso de lote de la operación siguiente es menor que el de la operación precedente, se debe garantizar que la elaboración de la última unidad del lote de proceso en la operación siguiente comience después de terminar el lote de proceso completo en la operación precedente. Por eso, el cálculo del parámetro se puede representar mediante la ecuación 29.

$$TT = PL_{PRECEDENTE} + P_{SIGUIENTE} - PL_{SIGUIENTE} \quad (29)$$

La **Figura 6** muestra la secuencia de operaciones para la situación descrita.

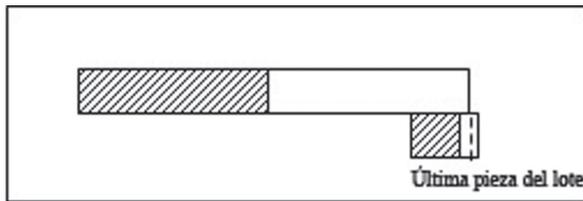


Figura 6. Lote de transferencia unitario

3.3 Diseño experimental

Para investigar el efecto de la utilización de diferentes tamaños de lote de transferencia, se utilizó un diseño factorial con bloques, compuesto por dos factores principales y un factor bloque.

El factor principal hace referencia al tamaño del lote de transferencia, y está compuesto por 4 niveles:

- i. *Lote de transferencia igual al lote de proceso:* con esta política se asume que cada lote debe ser procesado por completo en la operación precedente antes de ser trasladado a la siguiente máquina.
- ii. *Lote de transferencia igual al lote de proceso, anticipando la preparación de las máquinas:* representa el mismo comportamiento de la política anterior con respecto al movimiento de los lotes, permitiendo adicionalmente anticipar el alistamiento de la máquina donde se realiza la operación siguiente.
- iii. *Lote de transferencia igual a medio lote de proceso:* con esta política se asume que el traslado de los productos de una máquina a la siguiente ocurre en dos ocasiones para cada lote de proceso, la primera cuando se completa la mitad de las piezas que conforman el lote y la segunda cuando se completan las piezas restantes.
- iv. *Lote de transferencia unitario:* con esta política se transfiere cada unidad de producto a la siguiente máquina una vez haya finalizado su procesamiento en la máquina precedente.

En adelante, se hará referencia a este factor como la política de operación del sistema.

El segundo factor del diseño está representado por la demanda agregada del sistema. Aunque se sabe de antemano que el valor de las medidas de desempeño se incrementa en función de la cantidad de productos fabricados, la sospecha de que el efecto de la *política de operación* no es el mismo con diferentes niveles de demanda por la influencia de los tiempos de preparación, llevó a considerar la demanda total como

otro factor importante del diseño. Esta relación entre los dos factores, se conoce como *interacción* y resulta interesante investigar si es significativa.

El segundo factor está compuesto por tres niveles; en el primero se utilizó la demanda agregada de 92 unidades de producto propuesta en uno de los sistemas productivos del Instituto Avraham Y. Goldratt [20]. A este nivel se le denominó mediante el término *demanda básica*. Los otros dos niveles de demanda considerados resultan de multiplicar la demanda básica por 100 y por 1.000 respectivamente, buscando con estos dos escenarios minimizar el impacto que genera el tiempo de preparación de las máquinas y generar casos de estudios de producción a gran escala. Dichos niveles se designaron mediante los términos *demanda básica x 100* y *demanda básica x 1000*.

Como se trata de un problema determinístico en el que los tiempos de operación y de preparación son fijos, así como los niveles de demanda agregada, se replicó el experimento mediante la utilización de diferentes mezclas de productos, variando la participación de cada uno de ellos en la demanda agregada y manteniendo esta última constante. Los resultados del experimento pueden alterarse por el efecto de la mezcla, entonces, para mejorar la precisión de las comparaciones entre los factores de interés, se formaron bloques con las mezclas y se procesó una réplica de un experimento factorial completo dentro de cada bloque. Para tal fin, se fijaron 8 mezclas diferentes.

Como variables respuesta del diseño experimental se escogieron dos medidas de desempeño tradicionales: *el makespan* y *el mean flow time*. Sin embargo, cada una de ellas se analizó por separado.

El *makespan* representa el tiempo de salida de la última pieza del taller, en otras palabras, es el tiempo que demora el sistema en fabricar todos los trabajos que le han sido asignados.

El *mean flow time* es el valor ponderado de los instantes de salida o terminación de cada uno de los trabajos y se traduce como *tiempo promedio de flujo*. En esta investigación, se evaluó el tiempo promedio de flujo por unidad, que representa el tiempo que demora la fabricación de una unidad de cualquier producto, medido desde el momento en que llega al sistema hasta que finaliza su elaboración en la última máquina. Si n representa la cantidad de trabajos a fabricar, X_i el instante en que el trabajo i sale del sistema y D_i la cantidad de piezas que conforman el trabajo i , el tiempo de flujo

promedio por unidad se calcula como está expresado en la ecuación 30.

$$MFT = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \div D_i)}{n} \quad (30)$$

Las 8 mezclas de productos, 2 medidas de eficacia, 4 políticas de operación y 3 niveles de demanda producen un total de 192 situaciones posibles de análisis.

Cada observación del diseño experimental puede describirse mediante el modelo lineal mostrado en la ecuación 31.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \delta_k + \varepsilon_{ijk} \quad (31)$$

Donde μ es el efecto promedio global, τ_i es el efecto del nivel i -ésimo del factor política de operación, β_j es el efecto del nivel j -ésimo del factor demanda, $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre la política de operación y la demanda, δ_k es el efecto del factor bloque mezcla y ε_{ijk} es un componente del error aleatorio. En este diseño factorial el interés se centra en probar hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de los factores política de operación y demanda, así como del efecto de su combinación. Las hipótesis a probar se describen mediante las ecuaciones 32, 33 y 34.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0 \quad (32)$$

$$H_1: \text{al menos una } \tau_i \neq 0$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \beta_j \neq 0 \quad (33)$$

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todas las } i, j \quad (34)$$

$$H_1: \text{al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

3.4 Solución del modelo

Cada uno de los 192 casos de estudio, se procesó de manera individual para obtener su solución.

Debido al tamaño y la complejidad del problema de programación planteado, la solución del modelo se obtuvo a través del optimizador que utiliza el lenguaje de modelado de GAMS para resolver modelos matemáticos. El *Sistema General de Modelización Algebraica* (GAMS) [22] permite formular de manera eficiente y compacta todas las ecuaciones del modelo, construyendo las restricciones que siguen el mismo patrón simultáneamente. El optimizador utilizado para dar solución al modelo fue CPLEX, el cual utiliza el algoritmo de ramificación y acotamiento para resolver los problemas de programación entera.

Los archivos de salida de GAMS muestran el valor óptimo de la función objetivo, los tiempos de inicio de las operaciones y la asignación de máquinas correspondiente. Adicionalmente, para el mean flow time muestra los tiempos de finalización de cada uno de los trabajos, necesarios para el cálculo de esta variable.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

4.1 Análisis estadístico del makespan

Para analizar estadísticamente las diferencias entre los valores que toma la variable makespan en cada situación evaluada, se realizaron comparaciones homogéneas entre cada par de tratamientos mediante un análisis de varianza.

El cambio producido en la variable respuesta como consecuencia de la anticipación del tiempo de preparación y la utilización de lotes de transferencia, se representó mediante la normalización de los datos originales del makespan, usando como referencia en cada nivel de demanda el mayor valor obtenido. Por lo tanto, cualquiera de los datos normalizados es equivalente a un porcentaje del valor más grande obtenido para la medida de desempeño en su respectivo nivel de demanda, lo cual, hace posible el análisis de las diferencias entre las cuatro políticas de operación, sin la influencia de la relación directa existente entre el nivel de demanda y el valor de las medidas de desempeño.

El análisis de varianza que permite contrastar formalmente las hipótesis formuladas en la sección 3, se procesó con los datos normalizados. La **Tabla 1**, resume el análisis de varianza completo del experimento.

Tabla 1. Análisis de varianza – Makespan Normalizado

| Source | STATISTICS | | | | |
|-----------------|--------------------|----|-------------|--------|-------|
| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
| Corrected Model | 2,045 ^a | 18 | 0,144 | 202,8 | 0,000 |
| Intercept | 53,026 | 1 | 53,026 | 94686 | 0,000 |
| POLITICA | 1,900 | 3 | 0,633 | 1131 | 0,000 |
| DEMANDA | 0,000 | 2 | 0,000 | 0,343 | 0,711 |
| MEZCLA | 0,100 | 7 | 0,014 | 25,550 | 0,000 |
| POLITICA * | 0,044 | 6 | 0,007 | 13,218 | 0,000 |
| DEMANDA | | | | | |
| Error | 0,043 | 77 | 0,001 | | |
| Total | 55,114 | 96 | | | |
| Corrected Total | 2,088 | 95 | | | |

^aR Squared = ,970 (Adjusted R Squared = ,962)

Los niveles críticos (Sig.) para los factores *política* y *mezcla* ($p = 0,000 < 0,05$) proporcionan una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula formulada para estos factores, lo cual quiere decir con un nivel de significancia del 95% que los efectos de la *política de operación* y la *mezcla* son significativos. Lo anterior, justifica la elección del factor *mezcla* como un bloque del diseño experimental. Además, demuestra que existen diferencias significativas en la variable respuesta por la utilización de lotes de transferencia.

La sexta fila de la **Tabla 1** contiene información sobre el efecto de la interacción entre los factores *política de operación* y *nivel de demanda*. El estadístico F correspondiente tiene un nivel crítico de 0,000, lo cual indica con un nivel de significancia del 95% que la interacción *política*demanda* es significativa. Por consiguiente, las diferencias originadas en el makespan por la utilización de lotes de transferencia no son las mismas en los tres niveles de demanda considerados. Como ayuda para interpretar los resultados, se construyó el gráfico de perfil que muestra la **Figura 7**.

Como las líneas de la **Figura 7** no son paralelas, muestran que la interacción es significativa. Puede observarse que en cada nivel de demanda el efecto de cambiar la política de operación hacia la utilización de lotes de transferencia pequeños, reduce el valor del makespan. En general, se consigue la mayor reducción en el makespan con la política de tamaño de lote de transferencia unitario, independientemente del nivel de demanda. Sin embargo, al pasar de la primera política de operación a la segunda, el makespan disminuye sólo en el nivel de demanda básica y se mantiene en esencia 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 es una fracción importante del tiempo de procesamiento total del lote, por lo tanto, su anticipación ayuda a reducir el tiempo de terminación de todos los trabajos. Por otra parte, con lotes de proceso grandes, el tiempo de preparación de la máquina en comparación con el tiempo de fabricación del lote, es prácticamente despreciable, haciendo que la anticipación del alistamiento de la máquina no sea suficiente para reducir significativamente el tiempo de terminación de los productos.

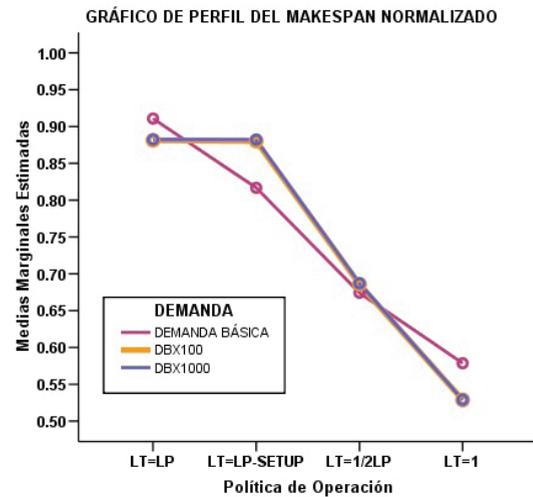


Figura 7. Gráfico de perfil – Makespan Normalizado

Como se encontraron diferencias significativas entre las políticas de operación, pero no se sabe en concreto cuales difieren entre sí, se realizó una prueba de comparaciones múltiples para contrastar las medias individuales de cada par de políticas, y así descubrir diferencias específicas. Las pruebas de comparaciones múltiples se aplicaron en cada nivel de demanda por separado, porque, la interacción entre los factores *demanda* y *política* hace que el efecto de éste último dependa de la cantidad de productos fabricados.

La **Tabla 2** muestra el resultado obtenido al realizar la prueba de comparaciones múltiples mediante el procedimiento de Sidak, el cual, rechaza la hipótesis de igualdad de medias en más ocasiones que otros métodos. Allí, los grupos cuyas medias difieren significativamente del nivel establecido ($\alpha = 0,05$), están marcados con un asterisco. En el nivel de demanda básica, todas las medias comparadas difieren significativamente y el menor valor en el makespan se obtiene cuando se utilizan lotes de transferencia unitarios. Por otra parte, en los niveles de demanda aumentada, se puede observar que no hay diferencias significativas entre el makespan obtenido con la primera política y el obtenido con la segunda. Se concluye que cuando se fabrican muchos productos, la anticipación de los tiempos de preparación no contribuye a mejorar la variable respuesta. Al igual que en la demanda básica, en los dos niveles de demanda aumentada las diferencias entre la primera política y las dos últimas son significativas.

Al analizar en cada nivel de demanda los pares de políticas de operación que son estadísticamente diferentes y compararlos con los resultados de los demás niveles, se logró establecer con qué demanda, la diferencia es más significativa. Como muestra la **Tabla 3**, son más significativas las diferencias encontradas entre cada par de medias en los niveles de demanda aumentada, a excepción de la diferencia entre el “makespan” de la primera política y la tercera, la cual es más significativa en el nivel de demanda básica.

Dado que en el modelo no se tuvo en cuenta el tiempo asociado con el transporte de los lotes de transferencia, es posible que las mejoras no se den en la magnitud observada porque el fraccionamiento de lotes aumenta la frecuencia de los movimientos de las piezas, ocasionando retrasos en el traslado de los productos y mayor dificultad para controlar el movimiento de los mismos a través del taller. De acuerdo con lo anterior, se hace necesario fijar para cada política el porcentaje de reducción mínimo que compensa los esfuerzos y requerimientos adicionales.

Como la distribución de planta de la configuración productiva analizada encaja con el enrutamiento de las partes, la utilización de lotes de transferencia no afecta drásticamente el control y movimiento de los productos, siendo necesaria solamente la racionalización de la distribución de la planta mediante la ubicación cercana de los centros de trabajo y el uso eficiente de los mecanismos de transporte. Por esta razón, para el caso de sistemas productivos tipo flow shop, se seleccionó un porcentaje mínimo del 25% para la política en la que se transfiere la mitad del lote de proceso y del 40% para la política de lotes de transferencia unitarios. Este último porcentaje es mayor porque, el traslado de lotes de transferencia unitarios es más complejo y debería contribuir a reducir el makespan en una mayor proporción. Como lo único que implica la segunda política es la anticipación de los tiempos de preparación, cualquier reducción que pueda obtenerse por esta vía es significativa.

Tabla 2. Comparaciones Múltiples – Makespan Normalizado

| DEMANDA | POLÍTICA DE TRANSF. | POLÍTICA DE OPERACIÓN | Mean Difference (I-J) |
|---------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| D1 | LT=LP | LT=LP-SETUP | 0,094 * |
| | | LT=1/2LP | 0,237 * |
| | | LT=1 | 0,332 * |
| | LT=LP-SETUP | LT=LP | -0,094 * |
| | | LT=1/2LP | 0,161 * |
| | | LT=1 | 0,238 * |
| | LT=1/2LP | LT=LP | -0,255 * |
| | | LT=LP-SETUP | -0,161 * |
| | | LT=1 | 0,077 * |
| | LT=1 | LT=LP | -0,332 * |
| | | LT=LP-SETUP | -0,238 * |
| | | LT=1/2LP | -0,077 * |
| D2 | LT=LP | LT=LP-SETUP | 0,001 |
| | | LT=1/2LP | 0,196 * |
| | | LT=1 | 0,353 * |
| | LT=LP-SETUP | LT=LP | -0,001 |
| | | LT=1/2LP | 0,194 * |
| | | LT=1 | 0,351 * |
| | LT=1/2LP | LT=LP | -0,196 * |
| | | LT=LP-SETUP | -0,194 * |
| | | LT=1 | 0,157 * |
| | LT=1 | LT=LP | -0,353 * |
| | | LT=LP-SETUP | -0,351 * |
| | | LT=1/2LP | -0,157 * |
| D3 | LT=LP | LT=LP-SETUP | 0,000 |
| | | LT=1/2LP | 0,195 * |
| | | LT=1 | 0,353 * |
| | LT=LP-SETUP | LT=LP | 0,000 |
| | | LT=1/2LP | 0,195 * |
| | | LT=1 | 0,353 * |
| | LT=1/2LP | LT=LP | -0,195 |
| | | LT=LP-SETUP | -0,195 * |
| | | LT=1 | 0,158 * |
| | LT=1 | LT=LP | -0,353 * |
| | | LT=LP-SETUP | -0,353 * |
| | | LT=1/2LP | -0,158 * |

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

Dado que en el modelo no se tuvo en cuenta el tiempo asociado con el transporte de los lotes de transferencia, es posible que las mejoras no se den en la magnitud observada porque el fraccionamiento de lotes aumenta la frecuencia de los movimientos de las piezas, ocasionando retrasos en el traslado de los productos y mayor dificultad para controlar el movimiento de los mismos a través del taller. De acuerdo con lo anterior, se hace necesario fijar para cada política el porcentaje de reducción mínimo que compensa los esfuerzos y requerimientos adicionales.

Como la distribución de planta de la configuración productiva analizada encaja con el enrutamiento de las partes, la utilización de lotes de transferencia no afecta drásticamente el control y movimiento de los productos, siendo necesaria solamente la racionalización de la distribución de la planta mediante la ubicación cercana de los centros de trabajo y el uso eficiente de los mecanismos de transporte. Por esta razón, para el caso de sistemas productivos tipo flow shop, se seleccionó un porcentaje mínimo del 25% para la política en la que se transfiere la mitad del lote de proceso y del 40% para la política de lotes de transferencia unitarios. Este último porcentaje es mayor porque, el traslado de lotes de transferencia unitarios es más complejo y debería contribuir a reducir el makespan en una mayor proporción. Como lo único que implica la segunda política es la anticipación de los tiempos de preparación, cualquier reducción que pueda obtenerse por esta vía es significativa.

Tabla 3. Conveniencia de las políticas – Makespan

| CAMBIO DE POLÍTICAS | Se justifica con demandas: | Reducciones más significativas con demandas: |
|---------------------|----------------------------|--|
| 1 | 2 | Pequeñas |
| | 3 | Grandes y pequeñas |
| | 4 | Grandes y pequeñas |
| 2 | 3 | Grandes y pequeñas |
| | 4 | Grandes y pequeñas |
| 3 | 4 | Grandes y pequeñas |

La **Tabla 4** muestra las conclusiones obtenidas al considerar el tema del transporte y control de materiales.

Tabla 4. Consideración de manejo de materiales

| POLÍTICA INICIAL | POLÍTICA FINAL | SE JUSTIFICA EN: | REDUCCIÓN |
|------------------|----------------|-------------------|---------------|
| 1 | 2 | Demanda Básica | 9,0% - 10,7% |
| | 3 | Demanda Básica | 25,7% - 30,1% |
| | 4 | DBX100 DBX1000 | 37,2% - 42,5% |

4.2 Análisis estadístico del Mean Flow time

Para analizar estadísticamente las diferencias entre los valores que toma la variable mean flow time en cada situación evaluada, se realizaron comparaciones homogéneas entre cada par de tratamientos mediante un análisis de varianza.

El análisis de varianza que permite contrastar formalmente las hipótesis formuladas en la sección 3, se resume en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Análisis de Varianza – Mean Flow Time

| Source | Statistics | | | | |
|----------------------|---------------------|----|-------------|--------|------|
| | Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
| Corrected Model | 219814 ^a | 18 | 12211,94 | 346,25 | 0,00 |
| Intercept | 3236023 | 1 | 3236023 | 91751 | 0,00 |
| POLÍTICA | 158463,2 | 3 | 52821,07 | 1497 | 0,00 |
| DEMANDA | 32600,03 | 2 | 16300,01 | 462,16 | 0,00 |
| MEZCLA | 23681,27 | 7 | 3383,038 | 95,92 | 0,00 |
| Política* Demanda | 5070,459 | 6 | 845,0765 | 23,961 | 0,00 |
| Error | 2715,749 | 77 | 35,26947 | | |
| Total | 3458553 | 96 | | | |
| Corrected Total | 222530,7 | 95 | | | |

^aR Squared = ,988 (Adjusted R Squared = ,985)

Los niveles críticos (Sig.) de los factores *política de operación, demanda y mezcla* ($p = 0,000 < 0,05$) proporcionan una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula, lo cual quiere decir con un nivel de significancia del 95% que los efectos estos factores son significativos. Por lo tanto, el tiempo de flujo varía considerablemente cuando se utilizan diferentes tamaños de lote de transferencia, niveles de demanda y mezclas de productos.

Analizando el estadístico F obtenido en la tabla del análisis de varianza para los efectos del factor *política* ($F = 1498$), *demanda* ($F = 462,6$) y *mezcla* ($F = 95,9$), se observa que, como el estadístico asociado con la política de operación es mayor que los demás, la utilización de lotes de transferencia contribuye más a la variabilidad de los datos que los demás factores.

La sexta fila contiene información sobre el efecto de la interacción entre los factores *política de operación* y *nivel de demanda*. El estadístico F correspondiente tiene un nivel crítico de 0,000, lo cual indica con un nivel de significancia del 95% que la interacción *política*demanda* es significativa. Se concluye que las diferencias observadas en el mean flow time por la utilización de lotes de transferencia no son las mismas en los tres niveles de demanda considerados. Como ayuda para interpretar los resultados, se construyó el gráfico de perfil que muestra la **Figura 8**.

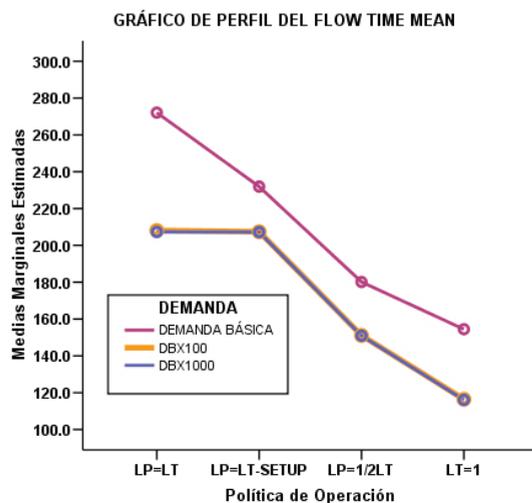


Figura 8. Gráfico de perfil – Mean Flow Time

Como las líneas de la figura no son paralelas, muestran que la interacción es significativa. Además, puede observarse que el efecto de cambiar la política de operación hacia la utilización de lotes de transferencia pequeños, reduce el valor del mean flow time. En general, se consigue la mayor reducción en el tiempo de flujo con la utilización de lotes de transferencia unitarios, independientemente del nivel de demanda. Sin embargo, al pasar de la primera política de operación a la segunda, el tiempo de flujo unitario disminuye sólo en el nivel de demanda básica y se mantiene en esencia sin cambio para los niveles de demanda aumentada. El comportamiento anterior, demuestra la influencia de los tiempos de preparación, porque, cuando se fabrican lotes de proceso pequeños

el tiempo de preparación es una fracción importante del tiempo de procesamiento total del lote, por lo tanto, su anticipación ayuda a reducir el tiempo de permanencia de los productos en el sistema. Por otra parte, con lotes de proceso grandes, el tiempo de preparación de la máquina en comparación con el tiempo de fabricación del lote, es prácticamente despreciable, haciendo que la anticipación del alistamiento de la máquina no sea suficiente para reducir significativamente el tiempo de permanencia de los productos en el sistema.

Como se encontraron diferencias significativas entre las políticas de operación, pero no se sabe en concreto cuáles difieren entre sí, se realizó una prueba de comparaciones múltiples para contrastar las medias individuales de cada una de las políticas, y así descubrir diferencias específicas. Las pruebas de comparaciones múltiples se aplicaron en cada nivel de demanda por separado, porque, la interacción entre los factores *demanda* y *política* hace que el efecto de éste último dependa de la cantidad de productos fabricados.

La **Tabla 6** muestra el resultado obtenido al realizar la prueba de comparaciones múltiples mediante el procedimiento de Sidak, el cual, es menos conservador que otros métodos, porque rechaza la hipótesis de igualdad de medias en más ocasiones. Allí, los grupos cuyas medias difieren significativamente del nivel establecido ($\alpha = 0,05$), están marcados con un asterisco.

En el nivel de demanda básica, todas las medias comparadas difieren significativamente y el menor valor en el mean flow time se obtiene cuando se utilizan lotes de transferencia unitarios. Por otra parte, en los niveles de demanda aumentada, se puede observar que no hay diferencias significativas entre el tiempo de flujo obtenido con la primera política y el obtenido con la segunda. Por consiguiente, cuando se fabrican muchos productos, la anticipación de los tiempos de preparación no contribuye a mejorar la variable respuesta. Al igual que en la demanda básica, en los dos niveles de demanda aumentada las diferencias entre la primera política y las dos últimas son significativas.

Al analizar en cada nivel de demanda los pares de políticas de operación que son estadísticamente diferentes y compararlos con los resultados de los demás niveles, se logró establecer con qué demanda, la diferencia es más significativa. Como muestra la **Tabla 7**, son más significativas las diferencias en el mean flow time con los niveles de demanda aumentada, a excepción de la diferencia entre el tiempo de flujo de la primera política y la tercera, la cual es más significativa en el nivel de demanda básica.

Al considerar las implicaciones en el manejo y control de materiales para evaluar los porcentajes de reducción de la misma forma como se hizo con la variable respuesta makespan, se obtienen los resultados que muestra la **Tabla 8**.

Utilizar lotes de transferencia de menor tamaño que los lotes de proceso y anticipar las preparaciones en las máquinas contribuye a mejorar el desempeño del sistema productivo estudiado en términos de las medidas de eficacia consideradas: el makespan y el mean flow time. En general, en todas las mezclas de productos y niveles de demanda considerados, el traslado de los productos en lotes de igual tamaño al lote de proceso, retrasa considerablemente la terminación de todos los trabajos y vuelve lento el flujo de las piezas, provocando acumulación de inventarios y generando posiblemente incumplimientos en las fechas de entrega prometidas. En contraste, la utilización de lotes de transferencia unitarios es la estrategia que provee el mejor desempeño en el sistema, generando reducciones en las medidas de desempeño que oscilan entre un 36% y un 44%, dependiendo del nivel de demanda considerado.

Tabla 6. Comparaciones Múltiples – Mean Flow Time

| DEMANDA | POLÍTICA DE OPERACIÓN | POLÍTICA DE OPERACIÓN | Mean Difference (I-J) |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| B | LT=LP | LT=LP-SETUP | 40,187 * |
| | | LT=1/2LP | 91,970 * |
| | | LT=1 | 117,659 * |
| | LT=LP-SETUP | LT=LP | -40,187 * |
| | | LT=1/2LP | 51,783 * |
| | | LT=1 | 77,473 * |
| | LT=1/2LP | LT=LP | -91,970 * |
| | | LT=LP-SETUP | -51,783 * |
| | | LT=1 | 25,690 * |
| | LT=1 | LT=LP | -117,659 * |
| | | LT=LP-SETUP | -77,473 * |
| | | LT=1/2LP | -25,690 * |
| DBX100 | LT=LP | LT=LP-SETUP | 0,689 |
| | | LT=1/2LP | 57,015 * |
| | | LT=1 | 91,702 * |
| | LT=LP-SETUP | LT=LP | -0,689 |
| | | LT=1/2LP | 56,326 * |
| | | LT=1 | 91,013 * |
| | LT=1/2LP | LT=LP | -57,015 * |
| | | LT=LP-SETUP | -56,326 * |
| | | LT=1 | 34,687 * |
| | LT=1 | LT=LP | -91,702 * |
| | | LT=LP-SETUP | -91,013 * |
| | | LT=1/2LP | -34,687 * |

| | | | |
|---------|-------------|-------------|-----------|
| DBX1000 | LT=LP | LT=LP-SETUP | 0,089 |
| | | LT=1/2LP | 56,381 * |
| | | LT=1 | 91,218 * |
| | LT=LP-SETUP | LT=LP | -0,089 |
| | | LT=1/2LP | 56,292 * |
| | | LT=1 | 91,130 * |
| | LT=1/2LP | LT=LP | -56,381 * |
| | | LT=LP-SETUP | -56,292 * |
| | | LT=1 | 34,838 * |
| | LT=1 | LT=LP | -91,218 * |
| | | LT=LP-SETUP | -91,130 * |
| | | LT=1/2LP | -34,838 * |

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

Tabla 7. Conveniencia de las políticas - MFT

| CAMBIO DE POLÍTICAS | Se justifica con demandas: | Reducciones más significativas con demandas: |
|---------------------|----------------------------|--|
| 1 | 2 | Pequeñas |
| | 3 | Grandes y pequeñas |
| | 4 | Grandes y pequeñas |
| 2 | 3 | Grandes y pequeñas |
| | 4 | Grandes y pequeñas |
| 3 | 4 | Grandes y pequeñas |

Tabla 8. Consideración de manejo de materiales

| POLÍTICA INICIAL | POLÍTICA FINAL | SE JUSTIFICA EN: | REDUCCIÓN |
|------------------|----------------|------------------|---------------|
| 1 | 2 | Demanda Básica | 13,9% - 15,7% |
| | | Demanda Básica | 29,9% - 37,8% |
| | 3 | DBX100 | 25,3% - 29,8% |
| | | DBX1000 | 25,1% - 29,6% |
| | 4 | Demanda Básica | 39,9% - 46,8% |
| | | DBX100 | 41,9% - 46,3% |
| | DBX1000 | 41,8% - 46,2% | |

5. CONCLUSIONES

Además de reducir el tiempo de terminación de todos los trabajos en el sistema, el fraccionamiento de lotes reduce su variabilidad. En todos los niveles de demanda

se observó que la desviación estándar del makespan es mínima cuando se utilizan lotes de transferencia unitarios, lo cual significa que la medida de desempeño es menos sensible a la mezcla de productos con esta política. Este hallazgo es de gran utilidad porque en la práctica generalmente se tiene una mejor estimación de la demanda agregada que de la demanda específica para cada categoría de producto, por consiguiente, la utilización de lotes de transferencia unitarios, es conveniente para reducir la variabilidad asociada con la incertidumbre acerca de la proporción exacta de productos que conforman dicha demanda.

Si el objetivo es reducir el “makespan” en un sistema productivo que fabrica un volumen reducido de productos, lo mejor es utilizar lotes de transferencia iguales a la mitad del lote de proceso para justificar los esfuerzos adicionales en el manejo y control de los materiales. Pero, si el volumen de producción es elevado, lo mejor es utilizar lotes de transferencia unitarios. En cambio, si el objetivo es reducir el tiempo de flujo, con cualquier nivel de demanda la mejor opción es utilizar lotes de transferencia unitarios.

Finalmente, sería interesante que en investigaciones futuras se analizara el problema de fraccionamiento de lotes considerando dentro del propio modelo los tiempos de transporte de los productos, involucrando además variaciones con respecto a los tiempos de operación y los niveles de demanda. Otra variación importante del problema analizado en este estudio sería la consideración de tiempos de preparación dependientes de la secuencia, la utilización de tamaños de lote variables, la consideración de otras clases de sistemas productivos como los job shop y open shop y el análisis de los costos implicados en las decisiones de tamaño de lote de transferencia.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la VIE de la UIS, por el apoyo y financiación brindada al proyecto titulado “Evaluación del impacto del tamaño de lote de transferencia en la programación de operaciones de un sistema productivo tipo flow-shop”, código 5526, de donde surge el presente artículo de investigación.

7. REFERENCIAS

- [1] R. Jacobs and D. Bragg, “Repetitive Lots: flow-time reductions through sequencing and dynamic batch sizing,” *Decision Sciences*, vol. 19, 1988, pp. 281-294.
- [2] U.Karmarkar, “Lot-sizing and sequencing delays,” *Management Science*, vol. 33, 1987, pp. 419-423.
- [3] C. N. Potts, and K. R. Baker, “Flow shop scheduling with lot streaming,” *Operations Research Letters*, vol. 8, 1989, pp. 297-303.
- [4] D. Kropp and T. Smunt, “Optimal and heuristic models for lot splitting in a flow shop,” *Decision Sciences*, vol. 24, No. 4, 1990, pp. 691-708.
- [5] K. Baker and D. Pyke, “Solution procedures for the lot streaming problem,” *Decision Sciences*, vol. 21, No. 3, 1990, pp. 475-489.
- [6] R. Vickson and B. E. Alfredsson, “Two and three-machine flow shop scheduling problems with equal sized transfer batches,” *International Journal of Production Research*, vol. 30, 1992, pp. 1551-1574.
- [7] S. Benjaafar, “On production batches, transfer batches and lead times,” *IIE Transactions*, vol 28, No. 5, 1996, pp. 357-362.
- [8] T. Smunt, A. Buss and D. Kropp, “Lot splitting in stochastic flow shop and job shop environments,” *Decision Sciences*, vol. 27, No. 2, 1996, pp. 215-238.
- [9] S. Duzère-Pérès and J. Laserre, “Lot streaming in job-shop scheduling,” *Operations Research*, vol. 45, No. 4, 1997, pp. 584-595.
- [10] A. Drexl and A. Kimms, “Lot sizing and scheduling: survey and extensions,” *European Journal of Operational Research*, vol. 99, 1997, pp. 221-235.
- [11] R. Ruben and F. Mahmoodi, “Lot splitting in unbalanced production systems,” *Decision Sciences*, vol. 29; No. 4, 1998, pp. 921-949.
- [12] A. Langevin and D. Riopel, “Transfer batch sizing in flexible manufacturing systems,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 18, No.2, 1999, pp. 140-151.
- [13] A. Kalir and S. Sarin, “Evaluation of the potential benefits of lot streaming in flow-shop systems,” *International Journal of Production Economics*, vol. 66, 2000, pp. 131-142.
- [14] H. Stadler, “Multilevel lot sizing with setups times and multiple constrained resources: Internally

- Rolling Schedules with lot-sizing windows," Operations Research, vol. 51, No. 3, 2003, pp. 487-502.
- [15] C. Suerie and H. Stadtler, "The capacited lot-sizing problem with linked lot sizes," Management Science, vol. 49, No. 8, 2003, pp. 1039-1054.
- [16] D. Quadt and H. Kuhn, "Conceptual framework for lot-sizing and scheduling of flexible flow lines," International Journal of Production Research, vol. 43, No. 11, pp. 2291-2308.
- [17] K. Caballero. Evaluación del impacto del tamaño del lote de transferencia en la programación de operaciones de un sistema productivo del tipo flow-shop [Trabajo de Grado pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.
- [18] D. Biskup and M. Feldmann, "Lot streaming with variable sublots: an integer programming formulation," Journal of Operational Research, vol. 57, 2006, pp. 296-303.
- [19] S. Marimuthu, S. Ponnambalam and N. Jawahar, "Tabu search and simulated annealing algorithms for scheduling in flow shops with lot streaming" ProQuestScience Journals, Institution of Mechanical Engineers, 2007, pp. 317-330.
- [20] E. Goldratt. "Producción: como mejorar con TOC". Guía del Instructor. Instituto Avraham Y. Goldratt. 1996.
- [21] M. Niño. Evaluación del sistema de programación de operaciones DBR [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002.
- [22] GAMS/CPLEX. 2002. GAMS – The Solver Manuals. Washington D.C

8. CURRICULUM

Myriam Leonor Niño López. Ingeniera Industrial UIS, Especialista en Gerencia de la Producción y Mejoramiento continuo UIS, Maestra en Administración ITESM (México), Doctora en Administración y Dirección de Empresas (España). Profesora Asociada de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales de la UIS. Investigadora del Grupo OPALO. Áreas de trabajo: Dirección de procesos productivos y logísticos, programación de operaciones.

Edwin Alberto Garavito Hernández. Ingeniero Industrial UIS, Especialista en Gerencia de la Producción y Mejoramiento continuo UIS, Candidato a Magister en Ingeniería Industrial de la Universidad de Mayagüez (Puerto Rico). Profesor Asistente de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales de la UIS. Investigador del Grupo OPALO. Áreas de trabajo: Diseño de sistemas productivos y logísticos, simulación, Ingeniería de Calidad.

Gladys Andrea Galeano Rodríguez. Ingeniera Industrial de la UIS, Distinción Suma Cum Laude.