

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL TAMAÑO DE LOTE DE TRANSFERENCIA
EN EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA PRODUCTIVO TIPO JOB SHOP
CONSIDERANDO TIEMPOS DE TRANSPORTE

PAULA JULIETH JAIMES SANMIGUEL
JULIETH VANESSA RIVERA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA

2015

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL TAMAÑO DE LOTE DE TRANSFERENCIA EN EL
DESEMPEÑO DE UN SISTEMA PRODUCTIVO TIPO JOB SHOP
CONSIDERANDO TIEMPOS DE TRANSPORTE

PAULA JULIETH JAIMES SANMIGUEL
JULIETH VANESSA RIVERA GONZÁLEZ

Proyecto de grado para optar al título de
Ingenieras Industriales

Directora
MYRIAM LEONOR NIÑO LÓPEZ
Doctora en administración y dirección de empresas

Codirector
HENRY LAMOS DIAZ
Doctor en Física-Matemática

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA

2015

A Dios, por permitirme alcanzar este logro y por tantas bendiciones recibidas a lo largo de mi vida.

A mis papás, por ser mi guía y apoyo incondicional, y por todo lo que me han permitido aprender de su ejemplo.

A la tía Mari, quien me acompañó durante esta etapa y me heredó su cariño por la UIS.

A mi familia, por llenarme de amor, creer en mí y motivarme continuamente.

Paula.

A mi madre, que con su fortaleza y su amor siempre me ha apoyado, guiado y animado para asumir nuevos retos.

A mi hermanita, quien cada día me motiva para lograr mejores cosas.

A Óscar Espitia, por su apoyo constante, su cariño y su compañía.

A mi familia, por todas sus enseñanzas, consejos y momentos compartidos.

Vanessa.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por todos los espacios académicos y culturales ofrecidos durante estos 5 años, que han contribuido a nuestra formación integral.

A la profesora Myriam Niño por brindarnos la oportunidad de realizar esta investigación, y por su orientación y acompañamiento constante durante el desarrollo del trabajo.

Al profesor Henry Lamos, por su asesoría y su disposición a resolver nuestras inquietudes en aspectos clave del proyecto.

Al grupo de investigación ÓPALO por abrirnos sus puertas, especialmente a Karín Aguilar por compartimos sus experiencias y aconsejarnos en momentos de dificultad.

A nuestros compañeros, que han vivido esta experiencia con nosotras y la han enriquecido con su amistad.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	21
3. OBJETIVOS	23
3.1 OBJETIVO GENERAL	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	24
5. MARCO CONCEPTUAL	26
5.1 PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES	26
5.1.1 Terminología de la programación de operaciones.....	28
5.1.2 Complejidad de la programación de operaciones.....	30
5.1.3 Métodos de solución.....	31
5.1.4 Programación lineal.....	34
5.1.5 Apoyos informáticos.....	36
5.2 TEORÍA DE RESTRICCIONES TOC	37
5.3 FRACCIONAMIENTO DE LOTES	38
5.3.1 Clasificación de los problemas de fraccionamiento de lotes.....	39
5.4 SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE MATERIALES	42
5.5 DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS.....	44
6. ESTADO DEL ARTE	47
6.1 MODELOS DE TIEMPO	47

6.2 MODELOS DE COSTO	54
6.3 MODELOS QUE INTEGRAN LOS ENFOQUES DE TIEMPO Y COSTO	61
7. SISTEMA PRODUCTIVO OBJETO DE ESTUDIO	62
7.1 DESCRIPCIÓN	62
7.2 MODELADO POR PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA	64
8. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	74
8.1 RECONOCIMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	74
8.2 SELECCIÓN DE FACTORES Y SUS NIVELES	74
8.2.1 Política de fraccionamiento.....	74
8.2.2 Volumen de producción.	75
8.2.3 Mezcla de productos.....	75
8.3 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA.....	76
8.4 SELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	78
8.5 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO	79
8.5.1 Parametrización del modelo.....	79
8.5.2 Resultados obtenidos.	85
9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	87
9.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE MAKESPAN	87
9.1.1 Análisis descriptivo	87
9.1.2 Análisis de varianza.	91
9.1.3 Pruebas no paramétricas.....	92
9.1.4 Comparaciones múltiples.....	94
9.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD OCIOSA DE MÁQUINAS DE PROCESO.....	98

9.2.1 Análisis descriptivo.	98
9.2.2. Análisis de varianza.	103
9.2.3 Pruebas no paramétricas.....	103
9.2.4 Comparaciones múltiples.....	104
9.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD OCIOSA DE AGENTES TRANSPORTADORES.....	106
9.3.1 Análisis descriptivo.	106
9.3.2. Análisis de varianza.	111
9.3.3 Pruebas no paramétricas.....	112
9.3.4 Comparaciones múltiples.....	113
10. CONCLUSIONES	116
11. RECOMENDACIONES	119
BIBLIOGRAFÍA.....	121
ANEXOS.....	126

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de sistemas de trayectoria fija.....	43
Tabla 2. Clasificación de sistemas de trayectoria móvil.....	44
Tabla 3. Mezclas de productos en los diferentes niveles de demanda.....	76
Tabla 4. Parámetro PS para operaciones en máquina de proceso.....	80
Tabla 5. Parámetro PS para operaciones en agentes transportadores.....	81
Tabla 6. Parámetro TC para operaciones en máquinas de proceso.....	81
Tabla 7. Parámetro TT.....	84
Tabla 8. Estadísticos descriptivos del makespan.....	91
Tabla 9. ANOVA del makespan.....	92
Tabla 10. Prueba de Kruskal Wallis para el makespan.....	93
Tabla 11. Prueba de Mann Whitney para el makespan.....	95
Tabla 12. Porcentajes de reducción del makespan.....	97
Tabla 13. Estadísticos descriptivos de la capacidad ociosa de máquinas.....	102
Tabla 14. ANOVA de la capacidad ociosa de máquinas.....	103
Tabla 15. Prueba de Kruskal- Wallis para capacidad ociosa de máquinas.....	104
Tabla 16. Prueba de Mann Whitney para capacidad ociosa de máquinas.....	105
Tabla 17. Porcentaje de reducción de la capacidad ociosa de máquinas.....	106
Tabla 18. Estadísticos descriptivos de la capacidad ociosa de transportadores.....	111
Tabla 19. ANOVA de la capacidad ociosa de agentes transportadores.....	111
Tabla 20. Prueba de Kruskal-Wallis para capacidad ociosa de transportadores.....	113
Tabla 21. Prueba de Mann Whitney para capacidad ociosa de transportadores.....	114
Tabla 22. Porcentaje de reducción de la capacidad ociosa de transportadores.....	115

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Makespan. Demanda básica.	87
Gráfica 2. Makespan. Demanda Básica*100	88
Gráfica 3. Demanda Básica*1000.....	88
Gráfica 4. Makespan. Interacción entre demanda y política de fraccionamiento. ...	90
Gráfica 5. Efecto principal de la demanda para capacidad ociosa de máquinas. ...	99
Gráfica 6. Capacidad ociosa de máquinas. Demanda básica.....	100
Gráfica 7. Capacidad ociosa de máquinas. Demanda básica*100.	100
Gráfica 8. Capacidad ociosa de máquinas. Demanda básica*1000.	101
Gráfica 9. Capacidad ociosa de máquinas. Interacción entre demanda y política de fraccionamiento.....	102
Gráfica 10. Efecto principal de la demanda para capacidad ociosa de transportadores.....	107
Gráfica 11. Capacidad ociosa de transportadores. Demanda básica.	108
Gráfica 12. Capacidad ociosa de transportadores. Demanda básica*100.....	108
Gráfica 13. Capacidad ociosa de transportadores. Demanda básica*1000.....	109
Gráfica 14. Capacidad ociosa de agentes de transportadores. Interacción entre demanda y política de fraccionamiento.....	110

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Configuración productiva bajo estudio	62
Figura 2. TT de proceso a transporte.....	83
Figura 3. TT de transporte a proceso cuando $TM+TR > PS$	83
Figura 4. TT de transporte a proceso cuando $TM+TR < PS$	84
Figura 5. Preparación anticipada	84
Figura 6. Diagrama de Gantt	86

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Formulación general del modelo matemático en la estructura propia del lenguaje de GAMS.....	126
Anexo B. Parámetros TC de las instancias.....	138
Anexo C. Parámetros PS de las instancias	146
Anexo D. Parámetros TT de las instancias.....	154
Anexo E. Reporte generado por Gams.....	162
Anexo F. Resultados de las variables de desempeño.	166
Anexo G. Verificación de los supuestos del ANOVA.	171
Anexo H. Transformación de los resultados obtenidos.....	175

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL IMPACTO DEL TAMAÑO DE LOTE DE TRANSFERENCIA EN EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA PRODUCTIVO TIPO JOB SHOP CONSIDERANDO TIEMPOS DE TRANSPORTE*

AUTORES: PAULA JULIETH JAIMES SANMIGUEL. JULIETH VANESSA RIVERA GONZÁLEZ.**

PALABRAS CLAVES: Fraccionamiento de lotes, lote de transferencia, job shop, tiempo de transporte, makespan, programación lineal entera mixta.

DESCRIPCIÓN

El fraccionamiento de lotes, también conocido como *lot streaming*, es una técnica de programación de operaciones que permite que dos operaciones sucesivas puedan procesarse simultáneamente, gracias al transporte frecuente de lotes transferencia menores al lote de proceso. Este trabajo aborda el problema de programación en un taller productivo tipo job shop y busca analizar estadísticamente el impacto del *lot streaming* sobre la medida de desempeño makespan y el comportamiento de la capacidad ociosa de los recursos, bajo cambios en la política de fraccionamiento aplicada en el taller. Se han definido cuatro políticas de fraccionamiento; la primera consiste en la transferencia del lote de proceso completo; la segunda, en el lote de proceso dividido en dos; y la tercera y cuarta política corresponden a transferencias de tres y cuatro sublotes, respectivamente. El comportamiento de las variables de desempeño se estudia para tres niveles de demanda que afectan la carga productiva del sistema, con el fin de determinar el beneficio de cada política en escenarios de pequeña, mediana y gran escala de volúmenes de producción. Además, se varía el porcentaje de participación de cada producto en la demanda agregada, para eliminar el efecto que esta pueda tener sobre la variable respuesta. Adicionalmente, teniendo en cuenta que la aplicación del fraccionamiento de lotes conlleva al aumento de la transferencia de materiales, se consideran las actividades de transporte dentro del estudio para brindar una aproximación más realista al problema. Cada política de fraccionamiento se modela por medio de programación lineal entera mixta y se resuelven todas las instancias con el software GAMS y el optimizador CPLEX. El análisis estadístico demuestra que el fraccionamiento de lotes representa un beneficio significativo en el desempeño del sistema.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de estudios industriales y empresariales. Director: Myriam Leonor Niño López. Codirector: Henry Lamos Díaz.

ABSTRACT

TITLE: TRANSFER BATCH SIZE IMPACT STUDY ON A JOB SHOP ENVIRONMENT PERFORMANCE CONSIDERING TRANSPORTATION TIMES*

AUTHORS: PAULA JULIETH JAIMES SANMIGUEL. JULIETH VANESSA RIVERA GONZÁLEZ.**

KEYWORDS: Lot streaming, transfer batch, job shop, transportation time, makespan, mixed integer linear programming.

DESCRIPTION:

Lot streaming is an operational scheduling technique which allow overlapping between successive operations because of the frequent transport of transfer batches smaller than the process lot. This study addresses the scheduling problem in a job shop environment and aims to statistically evaluate the lot streaming impact on the dependent variables makespan and idle capacity of resources, while applied lot streaming policy changes. Four lot streaming policies have been determined, the first one consist in transferring the whole process lot; the second one, transferring the process lot halved; and the third and fourth policies establish transferences of three and four batches, respectively. The variable performance is studied for three demand levels which affect the system production burden, in order to determine the benefit of every policy on small, medium and large production volume scales. Besides, products mix in demand is varied to eliminate its influence on dependent variables. Also, taking into account lot streaming increase material movements, transportation activities are considered for the purpose of giving a more realistic approach. Every lot streaming policy is modeled by mixed integer linear programming and all instances are solved in GAMS. Finally, statistical analysis shows the benefit on the system performance by applying this technique.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de estudios industriales y empresariales. Director: Myriam Leonor Niño López. Codirector: Henry Lamos Díaz.

INTRODUCCIÓN

Las grandes exigencias del mercado actual, producto de una alta competencia, un mundo globalizado y continuos cambios económicos, han convertido a la administración de operaciones en un elemento estratégico para las organizaciones. Considerando el aumento de la competencia y por tanto, el gran número de opciones disponibles para los consumidores, proporcionar un elevado servicio al cliente es un aspecto clave para asegurar una posición competitiva en el mercado. El nivel de servicio proporcionado se mide fundamentalmente en términos de calidad y rapidez de respuesta a las necesidades de los consumidores. De allí la importancia de establecer, desde la administración de operaciones, una estrategia basada en tiempos, que permita acelerar el proceso de producción y reducir considerablemente los plazos de entrega.

En este sentido, se han desarrollado diferentes enfoques que contribuyen, entre otras cosas, a acelerar el flujo de los productos dentro del taller productivo, como la filosofía justo a tiempo JIT y la teoría de restricciones TOC. No obstante, la implementación de estos enfoques de producción requiere un elevado número de modificaciones como adaptación de la distribución de planta, cambio en las relaciones con los proveedores, cambios en los sistemas de control, entre otros; razón por la cual puede resultar muy complejo para algunas organizaciones efectuar todas las transformaciones que estas filosofías requieren.

Como resultado de esta situación, la comunidad científica ha propuesto el *lot streaming* o fraccionamiento de lotes como una técnica que refuerza los planteamientos de JIT y TOC, que permite reducir el tiempo total de producción y

por lo tanto, los tiempos de entrega; con la ventaja adicional de que puede implementarse en el corto plazo y no exige cambios radicales en el sistema.

La investigación busca analizar estadísticamente el impacto de esta técnica en un taller productivo tipo job shop, considerando tiempos de transporte, bajo diferentes escenarios de utilización de los recursos y políticas de fraccionamiento.

El contenido del presente libro, está organizado de la siguiente manera. Los primeros tres capítulos presentan el planteamiento del problema que se desea estudiar, la justificación y los objetivos que se desean alcanzar. El capítulo 4 describe la metodología implementada para la realización del presente estudio. El capítulo 5 presenta los principales conceptos y teorías concernientes al fraccionamiento de lotes. El capítulo 6 agrupa los estudios más recientes de la técnica bajo estudio, que tienen en cuenta la consideración del transporte. En el capítulo 7 se describe el sistema productivo objeto de estudio y el modelo de programación lineal entera mixta desarrollado para establecer la programación de las operaciones. El desarrollo de las fases del diseño experimental, se muestra en en el capítulo 8. En el capítulo 9 se expone el análisis estadístico de las variables de interés. Finalmente, los capítulos 10 y 11, presentan las conclusiones y recomendaciones que surgen de la investigación realizada.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la influencia que tiene en el corto plazo la programación de operaciones sobre los tiempos de finalización de los trabajos, se han desarrollado estrategias como el fraccionamiento de lotes para responder a las crecientes exigencias del mercado actual, en el cual el tiempo de respuesta al cliente se ha convertido en un factor diferenciador.

Tradicionalmente, para realizar el transporte de material entre dos máquinas, debe esperarse la finalización de todo el lote de producción en la máquina precedente. El fraccionamiento de lotes, conocido como *lot streaming* o *lot splitting*, es una técnica que permite que la operación subsiguiente inicie antes de la terminación de la operación anterior, gracias al transporte frecuente de lotes transferencia menores al lote de proceso. Estudios anteriores demuestran que el *lot streaming* permite que dos operaciones puedan procesarse simultáneamente, lo cual reduce los tiempos de finalización de los trabajos y el trabajo en proceso. Sin embargo, establecen que el fraccionamiento de lotes aumenta la frecuencia de los movimientos y esto impacta en el esfuerzo requerido de manejo de materiales dentro del sistema productivo.

En esta investigación, se pretende estudiar el impacto del fraccionamiento de lotes en un sistema productivo job shop, teniendo en cuenta las actividades de transporte. Para ello, se analizan cuatro políticas de fraccionamiento en tres niveles de demanda que reflejan la carga productiva del taller. Los datos obtenidos son analizados estadísticamente para validar los resultados y proporcionar información que sirva de apoyo para la toma de decisiones en la dirección de operaciones.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En el entorno competitivo actual, los empresarios necesitan establecer estrategias que proporcionen a la organización una posición competitiva sólida frente al mercado. Para que dichas estrategias aseguren un alto impacto en el rendimiento de la organización, es indispensable que se sustenten en la aplicación de conocimientos técnicos y no en fundamentos subjetivos o basados en la intuición, puesto que estos últimos no tienen un soporte racional para su construcción y formulación, y por tanto proporcionan resultados imprecisos. En consecuencia, surge la importancia de generar soluciones desde la academia, que permitan que la empresa se articule con los conocimientos originados a partir de la investigación.

Teniendo en cuenta que la Universidad Industrial de Santander, a partir de su compromiso de extensión, y el Grupo de Optimización y Organización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos OPALO, como unidad de investigación perteneciente a esta; están interesados en fomentar competencias investigativas que permitan la generación de conocimiento como fuente de desarrollo de las empresas, este trabajo plantea estudiar el impacto de la estrategia de fraccionamiento de lotes, con la finalidad de brindar una base teórica que apoye la toma de decisiones desde la dirección de operaciones.

Adicionalmente, para brindar una aproximación más realista al problema, en este estudio se incluye la consideración del tiempo de transporte, debido a que la aplicación del fraccionamiento de lotes conlleva al aumento de la transferencia de materiales y esto convierte el transporte en una actividad clave de la programación de operaciones. Dado que se trata de un problema que varía según las características de cada sistema productivo, se realiza un análisis para diferentes ambientes de producción que dependerán de la carga productiva del taller.

A pesar de que muchas investigaciones han considerado el efecto del fraccionamiento de lotes sobre el desempeño del sistema cuando se tienen en cuenta actividades de transporte, los resultados no han sido analizados con técnicas estadísticas que demuestren experimentalmente el impacto positivo del mismo sobre las medidas de eficacia a optimizar. De esta evidencia, se observa la necesidad de contar con información cuantitativa que justifique la implementación del *lot streaming* en un sistema productivo, lo cual es la principal motivación para la realización de este estudio.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto que tiene el fraccionamiento de lotes de proceso en lotes de transferencia, sobre la medida de desempeño makespan en un sistema productivo tipo job shop, considerando tiempos de transporte.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Documentar investigaciones recientes referentes al fraccionamiento de lotes, que tengan en cuenta actividades de transporte dentro de su estudio.
- Modelar por programación lineal entera mixta el problema de programación en un caso particular, para minimizar el *makespan*, contemplando fraccionamiento de lotes y tiempos de transferencia entre centros de trabajo consecutivos.
- Construir un diseño experimental que permita describir el comportamiento del sistema bajo diferentes políticas de tamaño de lote de transferencia y niveles de demanda.
- Resolver el modelo matemático planteado, por medio del software GAMS y el optimizador CPLEX.
- Realizar un análisis estadístico de los resultados que brinde un soporte científico a las conclusiones dadas.
- Elaborar un artículo de investigación de carácter publicable, que documente los aspectos más sobresalientes de esta investigación.

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolla de acuerdo a las etapas del método científico con el fin de proveer información para la toma de decisiones desde la dirección de operaciones, cuya validez se determine a partir de la experimentación. La formulación del problema particular que se desea resolver, la justificación y los objetivos que se desean alcanzar, proveen una base para iniciar el desarrollo de la investigación.

El estudio del problema se inicia a partir de una revisión de las bases teóricas, con el fin de comprender los conceptos fundamentales de la programación de operaciones y la estrategia de fraccionamiento de lotes. Posteriormente, se realiza una revisión de las investigaciones más recientes, referentes al fraccionamiento de lotes y se seleccionan y documentan los estudios que incorporan las actividades de transporte como un elemento clave para el análisis. Lo anterior, permite dar cumplimiento al primer objetivo específico. La exploración bibliográfica fue realizada en las siguientes bases de datos disponibles para la comunidad UIS: Elsevier, Proquest, Scopus, Springer y Web of science. Debido al interés por documentar los trabajos investigativos más recientes, la búsqueda se limitó al periodo de tiempo comprendido entre el año 2000 - 2014, las principales revistas consultadas son: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Omega, Computers and Operations Research, Computers and Industrial Engineering, International Journal of Production economics, Decision Sciences, Simulation Modelling Practice and Theory, Istanbul Commerce University Journal of Science, IIE Transactions, International Journal of Production Research.

Para el cumplimiento del segundo objetivo se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta, que consiste en un sistema de expresiones

matemáticas relacionadas para determinar la secuencia de operaciones que optimiza el desempeño de un sistema productivo tipo job shop.

El tercer objetivo corresponde a la construcción de un diseño experimental que consiste en la planeación de las actividades de recolección y análisis de la información requerida para llevar a cabo la investigación

El procesamiento de datos se realiza a partir del modelo de PLEM planteado, por medio del software GAMS y el optimizador CPLEX. Los datos obtenidos son analizados por medio de técnicas estadísticas para comprobar las hipótesis planteadas en el diseño experimental. De esta manera, se cumplen los objetivos cuarto y quinto, para emitir conclusiones concernientes al fraccionamiento de lotes.

5. MARCO CONCEPTUAL

El objeto de este marco teórico es reunir las principales temáticas que proporcionan la base de la investigación realizada. Para ello, se describen conceptos relacionados con los sistemas productivos, los antecedentes del fraccionamiento de lotes, las características de los problemas de lot streaming, los métodos de solución, los apoyos informáticos y el diseño experimental.

5.1 PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES

Las decisiones tomadas desde la dirección de operaciones juegan un papel fundamental en el éxito de una organización puesto que deben estar alineadas con la estrategia corporativa e incluso, con los objetivos de toda la cadena de suministro. Estas decisiones pueden ser de carácter estratégico, táctico u operativo dependiendo de su transcendencia en el horizonte de planeación. Las decisiones estratégicas afectan el largo plazo de las actividades, las decisiones tácticas cubren un horizonte de mediano plazo y las decisiones operativas se relacionan con las actividades repetitivas de la producción que permiten obtener resultados y alcanzar las metas establecidas en la planeación estratégica y táctica.

En el último nivel de decisión se encuentra la programación de operaciones, la cual es una de las decisiones más importantes en el taller productivo, cuyo propósito consiste en asignar una secuencia para las operaciones de los diferentes trabajos, que mejore el desempeño del sistema, de manera que se alcance una alta eficiencia en la utilización de los recursos productivos y un alto nivel de satisfacción del cliente producto de la reducción del tiempo de entrega de las órdenes. Las funciones ejecutadas para llevar a cabo esta programación son las siguientes:

- Asignación de recursos: Establecer personal y maquinaria para la ejecución de los pedidos existentes. Esta función se conoce como la planificación de capacidad del taller a corto plazo.
- Secuenciación de operaciones (Secuencing): Determinar el orden en que van a efectuarse las diferentes operaciones. La prioridad que se le otorga a las operaciones, depende de las medidas de desempeño que se busquen minimizar en el taller.
- Programación detallada (Scheduling): Determinar el instante de inicio y finalización de cada operación de acuerdo con la secuencia establecida previamente.

Los principales objetivos perseguidos en la programación del taller son el cumplimiento de las fechas de entrega, la disminución del inventario en proceso, suministro de información exacta del estado de los trabajos, la máxima utilización de las máquinas y la reducción de los costos de producción y de personal. No obstante, muchos de estos objetivos son conflictivos entre sí, y esto no permite la optimización de todos ellos de manera simultánea. Por lo tanto, la programación de operaciones se basa en la minimización de aquellos criterios que están estrechamente relacionados con los objetivos más importantes para la organización. Entre los criterios más comunes se encuentran:

- Intervalo de fabricación o *makespan*: Es el periodo de tiempo requerido para la finalización del último trabajo. Reducir el instante de finalización del total de órdenes, permite que los tiempos de entrega sean menores, impactando en la satisfacción del cliente y dando cabida a la producción de una mayor cantidad de trabajos en determinado periodo.
- Tiempo de flujo: Periodo de tiempo durante el cual una orden se encuentra en el taller.
- Tiempo medio de flujo: Tiempo promedio de permanencia de todos los trabajos en el taller. La minimización de esta medida impacta en la reducción del

producto en proceso, lo que a su vez permite que disminuya la inversión en manejo de inventario.

- Tardanza y retardo: “La tardanza es la diferencia positiva entre el tiempo de terminación de un trabajo (tiempo de flujo) y su fecha de entrega. Un trabajo tardío es aquel que se concluye después de su tiempo de entrega. El retardo se refiere a la diferencia entre el tiempo de terminación del trabajo y su fecha de entrega, y es diferente de la tardanza porque el retardo puede ser positivo o negativo.”¹
- Tiempo ocioso: Periodo de inactividad de los recursos productivos. Generalmente los procesos cuentan con recursos de mano de obra y maquinaria que limitan la capacidad productiva, por lo tanto, en la programación de operaciones se busca darles un máximo aprovechamiento para dar mayor respuesta a la demanda del mercado.

5.1.1 Terminología de la programación de operaciones. Cabe aclarar que la complejidad del problema de programación depende de las secuencias de trabajo establecidas en el taller, y éstas dependen de la configuración productiva del mismo. Las configuraciones más conocidas se describen a continuación:

- Single machine: Cada uno de los n trabajos, requieren un solo proceso.
- Máquinas en paralelo: Se supone la existencia de, por lo menos, un par de máquinas idénticas y que los n trabajos pueden procesarse en cualquiera de ellas. A pesar de ser máquinas idénticas, las características inherentes a cada una de ellas pueden generar que el producto terminado varíe de una máquina a la otra.
- Taller de flujo o flowshop: La ruta de los n trabajos está establecida previamente y es la misma para todos. Todos los trabajos deben pasar por las mismas máquinas, en el mismo orden.

¹ NAHMIAS, Steven. Programación de operaciones. En: Análisis de la producción y las operaciones. México: Compañía editorial continental, 2004. p 389.

- Taller o jobshop: Los n trabajos no requieren exactamente las mismas m operaciones, ni la misma ruta. Algunos trabajos pueden requerir varias operaciones en una misma máquina.
- Open shop: No existe una ruta establecida para los diferentes trabajos, es decir, en la programación es posible elegir el orden de las operaciones.

Con el fin de clarificar los conceptos fundamentales de los problemas de programación de operaciones, a continuación se definen algunos términos usados en la presente investigación.

- Tarea o trabajo: Grupo de unidades de un mismo producto que deben procesarse dentro del sistema productivo.
- Operación: Actividades de transformación que recibe una pieza para convertirse en producto terminado.
- Ruta: Secuencia de las operaciones que debe recibir un trabajo.
- Centro de trabajo: Espacio en el que se organizan los recursos productivos para desarrollar las operaciones. Puede estar constituido por una sola máquina o por un grupo de máquinas que realicen la misma clase de trabajo.
- Máquina procesadora: Recurso utilizado para realizar alguna transformación sobre las piezas.
- Agente transportador: Recurso destinado para transferir el material de una máquina procesadora a otra.
- Tiempo de ejecución: Tiempo dedicado a la fabricación de determinado número de piezas.
- Tiempo de preparación: Tiempo requerido para el acondicionamiento de una máquina cuando se debe realizar una operación a un trabajo con características diferentes a las del anterior.
- Tiempo de proceso: Suma del tiempo de ejecución y preparación de cada operación.

- Actividad de transporte: Acción de cargar y descargar material en el agente transportador, trasladarlo hasta la próxima estación y regresar el agente vacío a la estación anterior.
- Tiempo de viaje: Tiempo durante el cual las piezas son trasladadas de una máquina a otra en el agente transportador.
- Tiempo de carga y descarga: Tiempo requerido para adecuar en el agente transportador, las piezas disponibles en la máquina procesadora y viceversa.
- Tiempo de transferencia de material: Suma de los tiempos requeridos para llevar las piezas de una máquina a otra y realizar la carga y descarga del material.
- Tiempo de regreso: Tiempo empleado por el agente transportador vacío en el regreso a su centro de trabajo correspondiente.

5.1.2 Complejidad de la programación de operaciones. Los problemas de programación de operaciones pueden modelarse de acuerdo a las características que se deseen considerar. A lo largo de los años se han desarrollado ciertas reglas o procedimientos de programación para optimizar medidas de desempeño específicas. Por ejemplo, la regla *Shortest processing time* SPT proporciona una secuencia que minimiza el *makespan*, el tiempo promedio de espera y la tardanza promedio de n trabajos en una máquina; y la regla de Johnson encuentra una secuencia óptima de trabajos para minimizar el *makespan* en un flow shop de dos máquinas y n trabajos. Sin embargo, Buffa² señala que en los casos de programación en configuraciones con más de dos máquinas y dos trabajos, no es posible hallar la programación óptima por medio de un procedimiento estándar. Para encontrar soluciones óptimas en estas configuraciones se debe recurrir a métodos más robustos por medio de la modelación matemática. En estos problemas el espacio de solución estará compuesto por la todas las combinaciones posibles de secuencias y por lo tanto, la dificultad para encontrar la

² BUFFA; Elwood y SARIN; Rakesh. Programación de centros de trabajos. En: Administración de la producción y de las operaciones. México: Editorial Limusa, 1996. p.343.

programación óptima, aumenta a medida que se consideran configuraciones más complejas. Esta dificultad radica en que se debe realizar una mayor cantidad de iteraciones y esto aumenta el tiempo computacional de solución. En respuesta a esto, han surgido los algoritmos de solución aproximados para determinar la programación en tiempos computacionales aceptables. Sin embargo, estos no garantizan la optimalidad de la solución encontrada.

Por otro lado, debido a los múltiples intereses que intervienen en el entorno productivo, los directores de operaciones pueden optar por optimizar diferentes criterios simultáneamente. Esta situación adiciona mayor complejidad al problema de programación de operaciones considerando la naturaleza conflictiva entre muchos de estos criterios. Por este motivo, se han desarrollado diferentes técnicas multiobjetivo que buscan generar un equilibrio entre los criterios a optimizar y de esta manera, complacer los intereses involucrados. Pese a esto, la solución proporcionada por estas técnicas estará condicionada por la ponderación asignada a cada criterio y no satisface completamente cada uno de ellos.

Adicionalmente, el problema adquiere mayor complejidad a medida que se incluyen más consideraciones dentro del modelo, como tiempos de preparación, tiempos de transporte o paradas de producción. Otro de los supuestos que condiciona el problema, es el carácter determinístico/estocástico del comportamiento del sistema. En los modelos determinísticos, los elementos permanecen invariables, mientras que en los modelos estocásticos, los elementos siguen una distribución probabilística debido a las características aleatorias del problema.

5.1.3 Métodos de solución. Los problemas de programación de operaciones pueden resolverse con la ayuda de diferentes métodos. Se pueden mencionar tres enfoques diferentes para este fin: métodos exactos, métodos de aproximación y simulación de eventos discretos.

- Métodos exactos

Resulta natural el interés de los investigadores por encontrar la solución óptima de los problemas objeto de estudio. Por esta razón, se han desarrollado algunos métodos que se dirigen a este objetivo por medio de técnicas analíticas o matemáticas que convergen a una solución óptima.

Las formulaciones matemáticas modelan el problema por medio de la relación matemática de las diversas variables implicadas en el mismo. Hillier y Lieberman³ definen los modelos matemáticos como representaciones idealizadas conformadas por un sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas que describen la esencia del problema. Las características de las funciones, lineales o no lineales, y de las variables, enteras o binarias, determinan el modelo a utilizar: programación lineal, programación entera, programación no lineal, programación lineal entera mixta, entre otros.

Estos modelos pueden resolverse mediante búsqueda exhaustiva, es decir, evaluando todas las posibles soluciones en el espacio de búsqueda. Sin embargo, debido al excesivo tiempo computacional que pueden llegar a consumir, se han desarrollado algoritmos de solución como el método de Branch and Bound, Branch and Price, métodos de relajamiento, entre otros. El método B&B (Branch and Bound) es una herramienta de solución eficiente de un problema de programación entera y puede representarse como una búsqueda sistemática y organizada en un árbol de soluciones factibles. Dicha búsqueda se enfoca en los espacios en los que se sabe que puede estar la solución óptima y se desechan las opciones que no mejoran la solución actual.

³ HILLIER, Frederick; LIEBERMAN, Gerald. Introducción a las Investigación de operaciones.9 ed, México: Mc Graw-Hill, 2010. p.10.

- Métodos de aproximación

Este grupo de métodos representa una buena alternativa para la solución de algunos problemas de optimización que por su complejidad y tamaño no pueden ser resueltos por métodos exactos debido al tiempo computacional que requieren. Sin embargo, estos métodos no garantizan la optimalidad de la solución pero sí proporcionan una buena solución⁴. Generalmente se les conoce como heurísticas y su característica principal es el tiempo de solución corto, comparados con el de otros métodos.

Los métodos aproximados pueden ser métodos de búsqueda local y métodos constructivos. Los métodos de búsqueda local se fundamentan en el concepto de vecindad; es decir, parten de una solución inicial, analizan un conjunto de soluciones cercanas (vecindario) y eligen el mejor vecino hasta encontrar un óptimo local. Los métodos constructivos parten de soluciones parciales a las que van agregando componentes, que satisfagan las diferentes restricciones, hasta construir una solución completa que sea factible. Dentro de este grupo, se encuentran las reglas de secuenciación, las cuales se basan en la consecución de un objetivo específico por medio del establecimiento de criterios de prioridad para el orden de procesamiento de los trabajos. Algunas de ellas son: primeras llegadas, primeras salidas *FCFS (First come, first served)*, tiempo de procesamiento más corto primero *SPT (Shortest processing time)* y primera fecha de entrega *EDD (Earliest due date)*. Por otro lado, se ha propuesto las metaheurísticas como métodos que integran diferentes heurísticas de forma más robusta con el fin de evitar convergencia en óptimos locales para proporcionar mejores soluciones.

⁴ MORILLO, Daniel; MORENO, Luis y DÍAZ, Javier. Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPS): una revisión. En: Ingeniería y ciencia. 2014, vol 10, p. 261.

- Simulación de eventos discretos

Existe la posibilidad de que la complejidad del problema de programación supere la capacidad de los métodos mencionados anteriormente. En ese caso, es necesario acudir a este enfoque que, según Guasch, Piera, y Figueras⁵, es una metodología para representar la dinámica del proceso y facilitar su análisis. Este enfoque permite reproducir diferentes escenarios y el comportamiento que tendría el sistema, con el fin de evaluar diferentes alternativas y tomar decisiones con base en los resultados.

5.1.4 Programación lineal. La programación lineal consiste en modelar el problema de asignación de recursos a actividades que requieren de estos para su desarrollo. Esto la ha convertido en una herramienta de gran utilidad para la representación de problemas complejos de muchas compañías y específicamente para la resolución de problemas de programación de operaciones.

Su desarrollo determina los valores de las variables de decisión en busca de la optimización (minimización o maximización) de una medida global de desempeño, lo cual se representa por medio de una función objetivo. Lo anterior, sujeto a las limitaciones de los recursos y los requerimientos a satisfacer, incluidos dentro del modelo como restricciones. Todos los conjuntos posibles de los valores asignados a las variables se denominan soluciones. Aquellas que satisfacen todas las restricciones reciben el nombre de soluciones factibles; si al menos una restricción se infringe, la solución se considera no factible y no se tiene en cuenta en la evaluación de alternativas posibles. La meta de la programación lineal es elegir la solución que tenga el mejor valor de la función objetivo dentro del grupo de soluciones factibles, denomina como solución óptima.

⁵ GUASH, Antonio; PIERA, Miguel; CASANOVAS, Josep y FIGUERAS, Jaume. Modelado y Simulación. Aplicación a Procesos Logísticos. 2 ed, España: Ediciones UPC, 2003, p. 23-24.

La programación lineal parte del supuesto de que todos los parámetros dentro del modelo son constantes conocidos y todas las funciones son lineales. La linealidad está dada por dos características; proporcionalidad y aditividad⁶.

- La proporcionalidad establece que el indicador de eficiencia de la función objetivo (costo o ganancia) y la cantidad de requerimiento en cada función, deben ser proporcionales al valor de las variables consideradas en esa función, es decir, las variables sólo pueden ser de primer grado en cualquier término de las funciones.
- La aditividad establece que todas las funciones están constituidas por la suma de las contribuciones individuales de cada variable. Por lo tanto, no está permitido el producto de dos o más variables.

Gupta y Cozzolino⁷ proponen una estructura general del modelo matemático de programación lineal, como sigue:

$$\text{Max } E = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Sujeto a,

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_j \geq 0, \quad x_j \in \mathbb{R}^+ \quad \forall j = 1, 2, \dots, n$$

Donde E representa la función objetivo, x_j las variables de decisión y a_{ij} , b_i y c_i , los parámetros del problema. De acuerdo con la naturaleza del problema a tratar, la estructura anterior puede modificarse. Por ejemplo, se puede buscar la minimización de la función objetivo en lugar de su maximización, cuando los criterios a minimizar son costos o tiempos en lugar de utilidades. Además, algunas

⁶ HILLIER y LIEBERMAN. Op. Cit . p.32.

⁷ GUPTA; Shiv y COZZOLINO; John. Fundamentals of operations research for management. An introduction for quantitative methods. Linear Programming. Estados Unidos: Holden-Day, Inc, 1975, p.95-96.

restricciones se pueden formular con desigualdad en sentido mayor o igual que, o en forma de igualdad, y algunos problemas pueden eliminar la última restricción de no negatividad de las variables. De acuerdo con el tipo de variables que se consideren, la programación lineal puede ser:

- Programación lineal entera PLE: Todas las variables toman valores enteros.
- Programación lineal binaria PLEB: Técnica especial para variables que representan condiciones lógicas, de sí y no, por medio de los valores 1 y 0.
- Programación lineal entera mixta PLEM: El requisito fundamental de esta técnica es que las funciones sean combinaciones lineales de variables enteras, binarias y continuas.

En esta investigación se realiza una formulación matemática de PLEM para dar solución al problema propuesto.

5.1.5 Apoyos informáticos. Una vez seleccionado el método de solución, es necesario identificar la herramienta computacional que servirá de apoyo en este proceso. En esta investigación se plantea un modelo de programación lineal entera mixta, el cual se resolverá con ayuda del paquete de software de optimización CPLEX (producto de IBM ILOG). Este optimizador fue desarrollado inicialmente para proporcionar soluciones por medio del método simplex, pero actualmente, usa otros tipos de optimización matemática y está presente en diversos ambientes de modelado. Dentro de los entornos de modelado que incluyen CPLEX en su grupo de optimizadores, se encuentran GAMS (*General Algebraic Modeling System*), MPL (*Mathematical Programming Language*) o TOMLAB (ambiente de desarrollo creado para Matlab). El problema bajo estudio será resuelto por el *sistema general de modelado algebraico* GAMS.

5.2 TEORÍA DE RESTRICCIONES TOC

La tecnología de producción optimizada *OPT* es un sistema de programación de operaciones que tiene en cuenta un análisis completo de las restricciones que perjudican la capacidad del entorno productivo. Este sistema de programación fue propuesto por Eliyahu M. Goldratt y se fundamenta en la búsqueda del equilibrio en el flujo de producción a partir del análisis de restricciones.

Goldratt desarrolló su teoría de las restricciones TOC (de su nombre en inglés *Theory of constraints*), con el fin de promover más la lógica del sistema, que el sistema en sí. TOC se enfoca en todo aquello que condiciona la capacidad de un sistema para alcanzar la meta deseada. Se trata de un conjunto de conocimientos que brinda los lineamientos para identificar y administrar las restricciones tangibles e intangibles de un sistema, por medio de un proceso definido en cinco pasos:

- Identificar las restricciones del sistema, señalando cuáles recursos son la fuente de esta limitación.
- Elaborar un plan para sacar el mayor provecho de los recursos limitantes.
- Subordinar los otros recursos al plan elaborado en el punto anterior.
- Elevar la restricción, descargando trabajo o aumentando la capacidad disponible.
- Volver al paso uno, una vez se haya superado el grupo de restricciones identificadas en el proceso.

En su teoría, Goldratt describe nueve reglas básicas para programar la producción⁸:

- 1) No equilibrar la capacidad: equilibrar el ritmo.

⁸ CHASE, Richard B. y JACOBS, Robert F. Administración de restricciones. En: Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros. 13 ed. México: Mc Graw-Hill, 2011. p. 679.

- 2) El grado de aprovechamiento de un recurso que no restrictivo, no está determinado por su potencial sino por alguna restricción del sistema.
- 3) No es lo mismo el aprovechamiento que la activación de un recurso.
- 4) Una hora perdida en un cuello de botella es una hora perdida para todo el sistema.
- 5) Una hora ahorrada en una etapa que no es cuello de botella, es una ilusión.
- 6) Los cuellos de botella rigen la producción y las existencias del sistema.
- 7) El lote de transferencia no siempre es, ni debe ser, igual al lote del proceso.
- 8) Un lote de proceso debe variar tanto en la ruta como en el tiempo.
- 9) Para fijar prioridades hay que examinar las restricciones del sistema. El tiempo de espera es un derivado de la programación.

5.3 FRACCIONAMIENTO DE LOTES

La regla número siete de TOC, expuesta en la sección anterior, proporciona la técnica fundamental para la realización de este trabajo: el *lot streaming*. Esta técnica propone una diferenciación entre el lote del proceso y el lote de transferencia, descrita así: el **lote de proceso** es el número de piezas procesadas entre dos preparaciones consecutivas, mientras que el **lote de transferencia** es el número de piezas que se transportan entre dos centros de trabajo adyacentes.

De acuerdo con lo expresado, TOC sugiere que la determinación del tamaño del lote de transferencia representa una actividad de gran complejidad en vista de que los lotes pequeños agilizan la finalización de los trabajos y reducen el inventario, pero aumentan los requerimientos en cuanto al manejo de materiales, mientras que, los lotes grandes generan una dilatación en los tiempos de entrega y el volumen de inventario, pero exigen menos manejo de materiales. En virtud de lo anterior, esta decisión debe reflejar un equilibrio de prioridades entre los tiempos de entrega, el inventario en proceso y el manejo de materiales.

5.3.1 Clasificación de los problemas de fraccionamiento de lotes. Sancar, Ornek y Tursel⁹ plantean que los problemas de fraccionamiento de lotes se clasifican según los componentes que se tengan en cuenta en su estudio:

- **Diversidad de productos:** Los problemas pueden consistir en la fabricación de un sólo producto o de varios productos a la vez. En el primer caso, no es necesario establecer la programación puesto que esta ya está determinada por la secuencia que requiere el tipo de producto a fabricar, y por tanto, sólo es de interés estudiar la política de fraccionamiento más conveniente para el taller.
- **Configuración productiva:** Depende de la disposición de las estaciones y de la ruta que deban seguir los trabajos para desarrollar su proceso de fabricación. Las configuraciones más estudiadas son flow shop, job shop y open shop.
- **Tamaño del sublote:**
 - Sublotes fijos: El tamaño de todos los sublotes es el mismo para todos los productos, en todas las estaciones.
 - Sublotes iguales: El tamaño de los sublotes en todas las estaciones es el mismo para cada producto, pero puede diferir de un producto a otro.
 - Sublotes consistentes: Los sublotes de un mismo producto puede tener diferente tamaño, pero una vez establecido el tamaño de cada sublote, este no varía en el paso por las estaciones del taller.
 - Sublotes variables: El tamaño del sublote varía en el paso por el taller. Es decir, puede ser diferente en la transferencia entre las estaciones k y $k+1$ y la transferencia entre las estaciones $k+1$ y $k+2$.

⁹ SANCAR, Rahime; ORNEK Arslan y TURSEL, Deniz. A review on lot streaming problems with transportation activities. En: Istanbul Commerce University Journal of Science. 2007, vol 6, p 130-135.

- Divisibilidad del sublote: El sublote puede ser de carácter discreto o continuo, es decir, su tamaño puede corresponder a un número entero o a un número real.

- Secuencia entre sublotes:
 - Intermitente: El procesamiento de los sublotes de un producto puede ser interrumpido por sublotes de otro producto.
 - No intermitente: Los sublotes pertenecientes a un mismo producto deben procesarse de manera sucesiva sin la interrupción de sublotes de otro producto.

- Continuidad de la operación:
 - Tiempo ocioso entre sublotes: La programación permite, que en el procesamiento de un mismo trabajo, la máquina tenga intervalos de inactividad mientras espera el siguiente sublote a procesar.
 - Sin tiempo ocioso entre sublotes: Una vez se ha terminado el procesamiento de un sublote en determinada estación, se deberá iniciar inmediatamente el proceso del siguiente sublote, y así sucesivamente, hasta que se complete la operación de todos los sublotes pertenecientes al mismo trabajo.

- Programación de la transferencia:
 - Sin espera en la transferencia: Cada sublote debe transportarse y procesarse en la siguiente estación, inmediatamente después de haber terminado su procesamiento en la estación precedente.
 - Espera en la transferencia: La programación permite que exista un tiempo de espera entre las actividades de procesamiento y transferencia de un sublote.

- Medidas de desempeño:
 - Modelos de tiempo: El desempeño del sistema se mide en variables como el *makespan*, tiempo de flujo, tiempo de tardanza y tiempo de retardo.

Modelos de costo: El criterio a minimizar es la suma de los costos en los que se debe incurrir durante el desarrollo de las operaciones, como costo de preparación, costo de mantener inventario, costo de producción, costo de transporte de material, etc.

- Actividades de preparación: Las investigaciones pueden o no tener en cuenta estas actividades dentro de su estudio. Las investigaciones que lo consideran, abordan este componente de dos maneras diferentes:

Preparación anticipada: La preparación puede programarse antes de que los productos hayan llegado a la máquina.

Sin anticipar preparación: Se requiere que haya cierto número de unidades en la máquina en el momento de realizar la preparación.

Aparte de esta clasificación, cuando el tiempo de preparación en el que se incurre al procesar un trabajo en una máquina, depende del trabajo procesado previamente en la misma, la preparación se denomina dependiente de la secuencia. De lo contrario, se considera independiente.

- Actividades de transporte: Las investigaciones que tienen en cuenta estas actividades, pueden considerar únicamente el tiempo del movimiento del sublote entre los centros de trabajo, o pueden incluir en su consideración el tiempo de carga y descarga de material, el número de transportadores en el taller, la capacidad de los transportadores y el tiempo de regreso del transportador vacío. Adicionalmente, el tiempo de transferencia puede estimarse en función de la distancia recorrida entre centros de trabajo.

Además de la diferenciación establecida por Sancar et al. para las actividades de transporte, Ye¹⁰ establece que pueden clasificarse de la siguiente manera:

¹⁰ YE, Taofeng. Analysis on multi-stage lot streaming: The effect of transfer. En: Computers & Industrial Engineering. 2012, vol 62, p. 1047.

Dependiente del operador: El operador del centro de trabajo está encargado de realizar la transferencia de material, lo que implica que la operación se interrumpe mientras este realiza el transporte hasta la siguiente máquina. Esta transferencia puede realizarse tanto por el operador precedente como por el siguiente.

Independiente del operador: En este caso, se han destinado recursos exclusivos para la actividad de transporte, por lo cual la actividad de producción no se ve interrumpida en cada transferencia.

5.4 SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE MATERIALES

Las actividades de producción de un taller requieren que el material se transfiera entre los centros de trabajo, con la finalidad de que se lleven a cabo todas las operaciones necesarias para la terminación de un bien. Por lo tanto, a pesar de no ser una actividad generadora de valor para el cliente, la transferencia de materiales es imprescindible para el desarrollo del proceso productivo y tiene un efecto en el desempeño del mismo en términos de tiempo y costo.

La elección de un sistema de transferencia de materiales, se basa en las necesidades específicas de cada sistema productivo, en busca de hacer más eficientes sus operaciones. En esta elección se tienen en cuenta aspectos como las restricciones de las instalaciones, las características de los materiales, los requisitos de su manejo, la cantidad a transportar por viaje y la frecuencia de los movimientos. De acuerdo a sus particularidades de instalación, los sistemas se clasifican de la siguiente manera¹¹:

- Sistemas de trayectoria fija

Requieren una planificación cuidadosa de su instalación debido a que alteran el diseño de la planta en el largo plazo, por requerir un montaje permanente con

¹¹ GARAVITO, Edwin. Sistemas de transferencia de materiales [online]. Diseño de Plantas. Universidad Industrial de Santander. Disponible en: <<http://gavilan.uis.edu.co/~garavito/docencia/assignatura1>>

altos costos de reubicación. Dentro de esta clasificación los equipos se diferencian por el tipo de carga y la continuidad de la transferencia, como se muestra a continuación:

Tabla 1. Clasificación de sistemas de trayectoria fija

Transferencia continua de carga unitaria	Transferencia continua de carga a granel	Transferencia intermitente de carga unitaria y por lotes
<ul style="list-style-type: none"> • Toboganes • Transportadores de ruedas y rodillos • Bandas transportadoras • Transportadores de tablilla • Transportadores con riel en espiral • Robots 	<ul style="list-style-type: none"> • Polipastos con cucharones • Transportadores de cangilones • Elevadores de rotor • Transportador de gusano • Transportadores oscilatorios y vibratorios • Transportadores de paletas • Tubos neumáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Polipastos • Grúas de brazo • Grúas de puente • Elevadores de tenaza • Elevadores de sujeción superficial • Vehículos guiados automáticamente

- **Sistemas de trayectoria móvil**

Hace referencia a equipos que no dependen de una trayectoria establecida para su movimiento y por lo tanto brindan mayor flexibilidad en la transferencia. Estos equipos transportan de manera intermitente, cargas por lotes de producto o cargas unitarias de grandes tamaños. Dentro de esta clasificación los equipos se diferencian por el tipo de fuente de potencia utilizada para su funcionamiento, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de sistemas de trayectoria móvil.

Dependiente del operario o un tractor que se desconecta	Fuente de potencia propia
<ul style="list-style-type: none"> • Carretillas • Plataformas con ruedas • Patines semivivos • Contenedores con ruedas • Transportadores hidráulicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Montacargas contrabalanceados • Montacargas de caballete • Montacargas de carga lateral • Carros transportadores • Grúas industriales móviles

Para incluir la consideración de los tiempos de transporte en este estudio, se asumirá un sistema de transferencia intermitente debido a que en el sistema de transferencia continuo, el transporte de material entre centros de trabajo se puede realizar de forma ininterrumpida. En cambio, cuando se consideran sistemas de transferencia intermitentes, la disponibilidad de los agentes transportadores es una restricción para la continuidad de la operación, por lo cual el tiempo de producción puede verse afectado en mayor medida por las políticas de fraccionamiento de lote.

5.5 DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS

La experimentación es un método de investigación que ha sido de gran utilidad en la ingeniería de la producción como apoyo para el diseño de nuevos productos, desarrollo de procesos de manufactura y mejoramiento de procesos; ya que permite verificar la relación de causalidad existente entre ciertos factores sobre una variable de interés¹². De acuerdo con Moreno¹³, para que exista una relación de causalidad, la variable respuesta debe ocurrir como consecuencia de la ocurrencia de los factores y se debe garantizar la ausencia de otros posibles factores causales que interfieran en esta relación.

¹² MONTGOMERY, Douglas C. Estrategia de experimentación. En: Diseño y análisis de experimentos. Ed 2. México: Editorial Limusa, 2004. p. 1-2.

¹³ MORENO, Wilfrido. Metodología del diseño de experimentos. En: Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Colombia: Ediciones UIS. 1993. p. 11-15.

El diseño experimental consiste en la planeación de las actividades de recolección y análisis de la información requerida durante el desarrollo del experimento. Montgomery¹⁴ plantea que la metodología del diseño de experimentos se lleva a cabo de acuerdo a siete fases básicas:

Fase 1. Reconocimiento y formulación del problema: El éxito de una investigación radica principalmente en un planteamiento claro del fenómeno que se desea analizar y del objetivo que se quiere alcanzar con el experimento. Para ello, se recomienda consultar expertos en el tema a partir de una revisión de la literatura o de una discusión grupal donde los participantes contribuyan con el conocimiento de las posibles causas que originan el problema.

Fase 2. Selección de los factores y sus niveles: Los factores son variables independientes que pueden afectar el desempeño del proceso bajo estudio. En esta fase, se enumeran los factores y sus niveles, y se establece cuáles de ellos serán de interés para el estudio y cuáles deberán ser bloqueados para no distorsionar el análisis. Los niveles pueden ser fijos, es decir elegidos deliberadamente, o seleccionados de manera aleatoria de un conjunto de posibles niveles.

Fase 3. Selección de las variables respuesta: Se determina la variable respuesta a estudiar, es decir, la variable dependiente que proporciona información acerca del desempeño del proceso. Se debe establecer la manera de calcular esta variable y la escala en que va a ser medida.

Fase 4. Selección del diseño experimental: Se debe definir el número de observaciones a realizar, las hipótesis a probar y el modelo matemático usado para describir el experimento.

¹⁴ Ibid., p. 13-17.

Fase 5. Realización del experimento: En esta fase se realiza la recolección de datos, lo cual requiere de un proceso continuo de monitoreo y control para que todo el experimento se realice en condiciones uniformes y conforme a la planeación realizada en las fases anteriores.

Fase 6. Análisis de los datos: Se definen los procedimientos estadísticos utilizados para analizar los datos obtenidos en la experimentación y probar las hipótesis planteadas usando el modelo estadístico. Estos procedimientos asignan un nivel de confianza a los enunciados y garantizan su objetividad.

Fase 7. Conclusiones y recomendaciones: Basados en la aceptación o rechazo de las hipótesis planteadas, se realiza una interpretación de los resultados para darles el correspondiente significado en el lenguaje del problema bajo estudio. Estas conclusiones conducen a la elaboración de otras preguntas de interés en el problema y a recomendaciones para investigaciones futuras.

6. ESTADO DEL ARTE

El fraccionamiento de lotes ha sido estudiado por diferentes autores, como una ramificación del problema de programación de operaciones tradicional. Una consideración muy importante en este estudio, es el esfuerzo adicional que requiere su implementación, en el transporte de materiales a lo largo del taller. En este capítulo se presenta una revisión de las investigaciones más recientes que abordan el problema de programación de operaciones con fraccionamiento de lotes y que a su vez consideran las actividades de transporte.

Las investigaciones se agrupan de acuerdo a la clasificación establecida por Sancar, Orkned y Tursel¹⁵, quienes en el 2007 realizaron una revisión de literatura de investigaciones sobre *lot streaming* que incorporan actividades de transporte y propusieron tres categorías: una basada en modelos de tiempo, otra basada en modelos de costo y una en la que se integran estos dos enfoques.

6.1 MODELOS DE TIEMPO

La primera categoría se enfoca en la minimización de variables de tiempo como el *makespan*, tiempo medio de flujo, tiempo medio de retraso, desviación total de tiempos de entrega, entre otros. Para estos modelos se consideran las actividades de transporte por medio de la inclusión de tiempos de carga y descarga, tiempos de transporte y tiempos de regreso del transportador vacío, que inciden en estas variables.

En esta categoría sobresalen Kalir y Sarin¹⁶ quienes, en su estudio del año 2001, proponen un procedimiento para abordar el problema de programación de un taller

¹⁵ SANCAR, Rahime; ORNEK, Arslan M y TURSEL, Deniz. A review on lot streaming problems with transportation activities. En: Istanbul Commerce University Journal of Science. 2007, vol 6, p 129-142.

¹⁶ KALIR, Adar y SARIN, Subhash. Optimal solutions for the single batch, flow shop, lot-streaming problem with equal sublots. En: Decision Sciences. 2001, vol 32, p. 387-397.

tipo flow shop, con el fin de determinar el número óptimo de sublotes que minimiza el *makespan*, incorporando tiempos de transporte. Se considera un escenario en el que la transferencia es una actividad independiente y un segundo escenario en el que la transferencia es dependiente del operador. Bajo el supuesto de que la operación de transporte no es un cuello de botella, en el primer escenario, el tiempo de transporte sólo afecta el *makespan* por una contribución constante de la transferencia del primer sublote a través del sistema. Sin embargo, en el segundo escenario, el número de sublotes sí supone una contribución importante en el *makespan* debido a que la producción se detiene cada vez que debe ser transportado un sublote. Los autores proponen como futuras investigaciones realizar una extensión de su modelo para optimizar una combinación de medidas que involucre simultáneamente el *makespan*, tiempo medio de flujo, trabajo en proceso y costo.

La transferencia unitaria es la política de fraccionamiento central en la investigación realizada por Centikaya¹⁷ en el año 2006, allí se propone un algoritmo de tiempo polinomial para encontrar la programación óptima que minimiza el *makespan* de una celda de dos máquinas. Estos lotes son transportados por un sólo agente transportador que puede corresponder a un vehículo guiado automáticamente, una grúa o un brazo robótico. En este estudio se consideran tiempos de procesamiento, tiempos de preparación de máquinas, tiempos de transporte y tiempos de regreso del transportador vacío, los cuales son determinísticos e independientes de la secuencia. Asimismo, se asume que la operación de transporte no es un cuello de botella en la configuración y que en esta, están incluidas las operaciones de carga y descarga del agente transportador.

¹⁷ CENTIKAYA, Ferda. Unit sized transfer batch scheduling in an automated two-machine flow-line cell with one transport agent. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006, vol 29, p. 178–183

En ese mismo año, Van Nieuwenhuyse y Vandaele¹⁸ realizaron un estudio sobre la aparición de tiempos ociosos entre el procesamiento de sublotes consecutivos, producto del fraccionamiento de lotes y los tiempos de transferencia asociados, en un flow shop con dos máquinas y un sólo tipo de producto. Este trabajo analiza el comportamiento de los tiempos ociosos según las características del sistema y la política de fraccionamiento en un ambiente estocástico, y desarrolla una aproximación para la estimación de estos tiempos y del *makespan* obtenido, bajo la variación de los tiempos de procesamiento y de preparación. Su investigación se basa en las expresiones analíticas para estos tiempos ociosos en ambientes determinísticos, desarrolladas por Van Nieuwenhuyse y Vandaele¹⁹ en el 2004.

También en el 2006, Wright y Chang²⁰ buscan reducir el tiempo de ciclo en una fábrica de placas semiconductoras por medio de la técnica de fraccionamiento de lotes. Se desea conocer el tamaño óptimo del sublote que contribuya al logro del objetivo principal. La fábrica cuenta con un sistema automatizado de manejo de materiales que se encarga de transportar los sublotes de una máquina a otra. El tiempo de transporte es independiente del tamaño del sublote, pero depende de la distribución de planta y la carga y descarga de las piezas en las máquinas de proceso. Adicionalmente, se pretende encontrar el equilibrio entre la máxima utilización de las máquinas y el tiempo de ciclo total. Sus resultados demuestran la oportunidad de obtener menores tiempos de ciclo gracias a la utilización de lotes de transferencia más pequeños que los lotes de proceso.

¹⁸ VAN NIEUWENHUYSE, Inneke y VANDAELE, Nico. Analysis of gap times in a two-stage stochastic flow shop with overlapping operations. En: IIE Transactions. 2006, vol 38, p. 777–787.

¹⁹ VAN NIEUWENHUYSE, Inneke y VANDAELE, Nico. Determining the optimal number of sublotes in a single-product, deterministic flow shop with overlapping operations. En: International Journal of Production Economics. 2004, vol 92, p. 221–239.

²⁰ WRIGHT, D Rex Y CHANG, Tom. Cycle Time Perspectives for Small Transfer Batch Size. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. 2006. En: The 17th Annual SEMI/IEEE, p. 312-315.

Otra investigación del 2006, presenta un enfoque novedoso propuesto por Zhang y Gen²¹, para mejorar el desempeño de un algoritmo genético en la solución del problema de programación de operaciones en un sistema flexible de manufactura. El objetivo de su estudio es determinar la secuencia óptima para los sublotes variables que minimice el *makespan*, teniendo en cuenta los tiempos de preparación y tiempos de transporte. Se desea satisfacer los requerimientos de una cadena de suministro, tales como fecha de entrega, tiempo de preparación y tiempo de embarque. El estudio considera un ambiente multiplantas en el que el fraccionamiento de lotes sólo se realiza para las operaciones dentro de una misma planta. Si las piezas deben transportarse a otra planta, el lote de transferencia debe ser igual al lote de proceso. Los tiempos de transporte se consideran dependientes de la distancia entre los lugares de origen y destino. Su estudio demuestra la eficiencia del algoritmo propuesto.

Van Nieuwenhuysse y Vandaele²², estudiaron en este mismo año, el impacto de la implementación de la política de *lot streaming* en la reducción del tiempo de espera de cumplimiento de las órdenes en una cadena de suministro constituida por dos etapas. Con este fin, proponen una aproximación para estimar la confiabilidad de las entregas en un ambiente estocástico en el cual los tiempos de preparación, procesamiento y transporte siguen una distribución general. En este caso, los tiempos de transporte son independientes de la cantidad a transportar, debido al alto porcentaje que representa el componente fijo de tiempo de viaje entre proveedor y comprador. La estimación de la confiabilidad de las entregas se realiza con base en la varianza del tiempo entre llegadas de las órdenes, y demuestra que el envío de órdenes pequeñas y frecuentes mejora el desempeño de la cadena.

²¹ ZHANG, Haipeng; GEN, Mitsuo. Effective genetic approach for optimizing advanced planning and scheduling in flexible manufacturing system. En: Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation. ACM, 2006. p. 1841-1848.

²² VAN NIEUWENHUYSE, Inneke y VANDAELE, Nico. The impact of delivery lot splitting on delivery reliability in a two-stage supply chain. En: International Journal of Production Economics. 2006. Vol 104, p. 694–708.

En el año 2009, Sancar y Ornek²³ realizaron una simulación del problema de *lot streaming* de una configuración job shop multiproducto en un ambiente estocástico, con el fin de analizar el efecto de siete disciplinas de transporte diferentes sobre las medidas de desempeño *makespan*, tiempo de flujo de un sublote, tiempo de flujo de un lote, número sublotes tardíos y número de lotes tardíos. Las disciplinas de transporte contempladas consisten en priorizar el transporte del sublote según sus características: tamaño, número de artículos o posición en la secuencia de operaciones. Su estudio asume que los sublotes son iguales y consistentes y que existe un sólo transportador en el sistema con capacidad de cargar un sólo sublote a la vez. El tiempo total de transporte involucra los tiempos de carga y descarga y son dependientes del tamaño del sublote y del tiempo de viaje. Finalmente, proponen una heurística para determinar el número de sublotes de cada producto para mejorar las medidas de desempeño y sugieren como área de investigación futura, la consideración de múltiples agentes que puedan transportar sublotes pertenecientes a diferentes trabajos y diferentes máquinas procesadoras.

Zhao, Wang y Xu²⁴ publicaron una investigación en el año 2010 en la que se presenta el problema de fraccionamiento de lotes y el problema de programación en un taller productivo tipo job shop con el objetivo de minimizar el *makespan*. El tiempo de preparación de las máquinas, tiempo de procesamiento, tiempo de transferencia son considerados para el cálculo del *makespan*. Además, se consideran máquinas alternativas con intervalos prohibidos, en los cuales el equipo no está disponible por razones ajenas a la producción (por ejemplo,

²³ SANCAR, Rahime y ORNEK, Arslan. Simulation analysis of lot streaming in job shops with transportation queue disciplines. En: Simulation Modelling Practice and Theory. 2009, vol 17, p. 442–453.

²⁴ ZHAO, Yan-wei; WANG, Hai-yan; XU, Xin-li y WANG, Wan-liang. A new hybrid parallel algorithm for consistent-sized batch splitting job shop scheduling on alternative machines with forbidden intervals. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010, vol 48, p. 1091–1105.

mantenimiento). Se presenta un algoritmo basado en la evolución diferencial y algoritmo genético. Se realizan seis problemas de prueba para confirmar la validez del algoritmo y para probar su comportamiento bajo diferentes números de sublotes. A partir del análisis de los datos de los problemas de prueba, se percibe la reducción del *makespan* a partir del fraccionamiento de lotes.

En el 2010, el trabajo de Glassa y Possani²⁵ establece un algoritmo de tiempo polinomial para minimizar el *makespan* en un taller tipo flow-shop de dos máquinas y múltiples productos, teniendo en cuenta tiempos de transporte y preparación. El algoritmo permite determinar la secuencia óptima de los trabajos y el tamaño óptimo de los sublotes a programar, en el caso en que se consideran tiempos de transporte dependientes del trabajo y tiempos de transporte dependientes del tamaño del sublote. Como conclusión, los autores resaltan la influencia que tienen los tiempos de transporte sobre el resultado de los tamaños de los sublotes y la secuencia óptima.

Una investigación del año 2011, realizada por Yang y Shen²⁶ adopta una metodología de red neuronal para obtener los tamaños de lotes de transferencia que minimizan el tiempo de ciclo de un proceso de fabricación de películas delgadas de pantallas de cristal líquido en una configuración tipo flow-shop. En su estudio, el tiempo de transporte es una consideración muy importante, debido al alto porcentaje del tiempo de ciclo total que representa. La actividad de transporte es desarrollada por vehículos guiados automáticamente y se incluye en el modelo, por medio del tiempo de viaje entre estaciones y los tiempos de carga y descarga de los vehículos. Su estudio compara una estrategia de lotes variables y otra de lotes fijos para un caso práctico real. Además, se realiza una simulación de

²⁵ GLASSA, Celia y POSSANI, Edgar. Lot streaming multiple jobs in a flow shop. En: International Journal of Production Research. 2010, vol. 49, p. 2669–2681.

²⁶ YANG, Taho y SHEN Yu-An. The dynamic transfer batch-size decision for thin film transistor–liquid crystal display array manufacturing by artificial neural-network. En: Computers & Industrial Engineering. 2011. Vol 60, p. 769-776.

eventos discretos, para diferentes escenarios de volumen de trabajo en proceso, utilización de máquinas, volumen de materias primas y número de tipos productos a fabricar, y se compara el porcentaje de mejora en el desempeño del sistema para cada uno de los escenarios. Los resultados sugieren que la estrategia de dimensionado de lotes variables tiene mayores beneficios que la estrategia de dimensionado de lotes fijos.

En el año 2012, un estudio realizado por Ye²⁷, analiza el efecto de las actividades de transferencia de sublotos en un sistema productivo de múltiples etapas con un solo producto bajo la técnica de *lot streaming*. Se estudian tres tipos de transferencia (independiente del operador, dependiente del operador precedente y dependiente del operador siguiente) y su efecto en el desempeño del sistema. El objetivo es la minimización del *makespan* con la consideración de los tiempos de producción, tiempos de transferencia, tiempos de viaje del transportador vacío y las brechas de tiempo ocioso de las máquinas entre sublotos consecutivos descritas por Nieuwenhuysse y Vandaele (2004, 2006). Se formula un modelo matemático para cada uno de estos casos y se determina el número óptimo de sublotos. Se consideran tiempos de preparación insignificantes, tiempos de transporte independientes del tamaño de los sublotos y se asume que el tamaño de los sublotos es igual para todas las etapas. Esta investigación concluye que la actividad de transferencia independiente del operador de las máquinas, permite la mayor reducción del *makespan* en un taller de múltiples etapas y que sucesivamente, la transferencia basada en el operador precedente proporciona mejores resultados que la basada en el operador siguiente.

Lei y Guo²⁸, en el año 2013, plantearon un algoritmo artificial de colonia de abejas modificado para resolver el problema de fraccionamiento de lotes en un taller

²⁷ YE, Taofeng. Analysis on multi-stage lot streaming: The effect of transfer. En: Computers & Industrial Engineering. 2012, vol 62, p. 1046–1054.

²⁸ LEI, Deming y GUO, Xiuping. Scheduling job shop with lot streaming and transportation through a modified artificial bee colony. En: International Journal of Production Research. 2013. Vol. 51, No. 16, 4930–4941.

productivo job shop con tamaños consistentes para los sublotes y considerando los tiempos de transporte. Se desea encontrar una secuencia para todos los trabajos que minimice el *makespan*, asumiendo la existencia de un sólo agente transportador con capacidad para trasladar un sublote a la vez. El tiempo de transporte está compuesto por el tiempo de viaje entre máquinas y el tiempo de carga y descarga, el cual depende del tamaño del sublote. Los tiempos de preparación se incluyen dentro del tiempo de proceso. Se ejecutan 18 experimentos de prueba para el algoritmo y se comparan sus resultados con los arrojados por tres algoritmos diferentes. Los resultados demuestran la efectividad del algoritmo para resolver el problema bajo consideración y su superioridad comparado con los otros algoritmos seleccionados.

6.2 MODELOS DE COSTO

En la segunda categoría, se tiene en cuenta el costo por movimiento de material, para reflejar el esfuerzo que exigen las actividades de transporte involucradas en el *lot streaming*. En estos modelos, los criterios a minimizar incluyen todos los costos relacionados con producción, trabajo en proceso, preparación de máquinas, máquina ociosa y movimiento de material.

En el año 2000, Ramasesh, Fu, Fong y Hayya²⁹ presentaron un trabajo de investigación en el cual se busca la reducción de los costos relevantes de un sistema de manufactura de múltiples etapas que procesa un solo producto, cuando se emplea la técnica de fraccionamiento de lotes. Los costos relevantes del sistema se definen como la sumatoria de los costos de preparación, costos de transporte y los costos de mantenimiento de inventario, de producto en proceso y producto terminado, estos valores están en función del tamaño de los lotes de proceso y de transferencia. Se desea lograr a una aproximación realista, por lo

²⁹ RAMASESH, Ranga; FU , Haizhen; FONG, Duncan y HAYYA, Jack. Lot streaming in multistage production systems. En: International Journal of Production Economics. 2000. Vol 66, p. 199-211.

que se consideran los tiempos de preparación para cada operación, tiempos de transporte para cada sublote y tiempos de espera o tiempos de detención planeada para cada operación. Se demuestra, por medio de un análisis computacional, el potencial del modelo planteado para minimizar los costos del sistema.

Kim y Ha³⁰, en el año 2003, propusieron un modelo para aplicar la técnica de fraccionamiento de lotes en una cadena de suministro, de tal forma que el proveedor y el comprador trabajen de manera coordinada para mejorar el nivel de servicio al consumidor final. El modelo determina los valores de óptimos de la cantidad de la orden, el número de entregas y la cantidad enviada por entrega, basado en una función integrada de costos en lugar de funciones individuales para el proveedor y el comprador. Los costos del comprador incluyen el costo de ordenar, el costo de mantener inventario, el costo de transporte y el costo de recibir órdenes. Los costos del proveedor incluyen el costo de mantener inventario, el costo de preparación y el costo de manejo de órdenes. Según este planteamiento, el comprador asume el costo de transporte y recepción de órdenes con el fin de facilitar la frecuencia de las entregas. El estudio confirma las ventajas de establecer una estrategia integrada entre proveedor y comprador para facilitar múltiples entregas en pequeños lotes, debido al ahorro en costos que esto representa, comparado con la entrega tradicional.

Para estudiar los beneficios del *lot splitting* en una configuración job shop, Low, Hsu y Huang³¹ presentaron una investigación en el año 2004 en la cual se analiza la influencia del fraccionamiento en los costos del sistema y para ello se desarrolla un modelo que busca minimizar el *makespan* y obtener el costo total

³⁰ KIM, Seung-Lae y HA, Deasung. A JIT lot-splitting model for supply chain management: Enhancing buyer–supplier linkage. En: International Journal of Production Economics. 2003. Vol 86, p. 1–10.

³¹ LOW, Chinyao; HSU, Chih-Ming y HUANG, Kai-I. Benefits of lot splitting in job-shop scheduling. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2004, vol. 24, p. 773-780.

correspondiente a la programación óptima. Este modelo incluye el costo de preparación de las máquinas, el costo de inventario y el costo de manejo de materiales entre operaciones sucesivas. Se comparan 4 tipos de fraccionamiento de lote (lote entero sin fraccionamiento y fraccionamiento en 2, 3 y 4 sublotes de igual tamaño) en 4 tipos de entornos de fabricación que varían según el número de máquinas y de productos a fabricar. El modelo es resuelto por el Software Lingo en un computador Pentium II 266. Los resultados reflejan el impacto que tiene la técnica de fraccionamiento en la disminución del tiempo de procesamiento. Sin embargo, este impacto se hace menor a medida que se incrementa el número de sublotes.

Otro estudio realizado por Xiao y Li³², en el año 2004, desarrolla un modelo que permite coordinar decisiones de *lot streaming* entre múltiples eslabones de una cadena de suministro para alcanzar valores óptimos del costo total del sistema. Una de las principales hipótesis en que se basa su estudio, es que el costo de transporte entre cada par de eslabones es fijo e independiente del tamaño de envío. Más tarde, Ye y Da³³ hacen una extensión de este modelo, argumentando que el supuesto de costo de transporte fijo, sólo es válido cuando la cantidad del envío equivale a la carga del vehículo, pero en el caso de que la carga sea menor, los costos pueden basarse en un cargo de contratación de transporte dependiente del peso del envío. Con este análisis, se encuentra que la decisión óptima del proveedor con la consideración más realista del costo de transporte, difiere de la decisión con el costo de transporte fijo. Sin embargo, esta extensión no incorpora múltiples etapas en la cadena y los autores proponen su análisis para futuras investigaciones.

³² Li, W.-Q. Xiao. Lot streaming with supplier-manufacturer coordination. En: Naval Research Logistics, 2004, 51: 522-542.

³³ YE Tao-feng y DA Qing-li. A Development on Lot streaming with Supplier-Manufacturer Coordination. En: International Conference on Management Science & Engineering. 2009. Vol 16, p. 528-533.

En ese mismo año, el estudio de Chiu, Chang y Lee³⁴ desarrolla dos heurísticas para resolver el problema de programación en sistemas productivos de múltiples etapas con actividades de transporte o transferencia. El objetivo del modelo matemático es encontrar el número óptimo de lotes de transferencia, la asignación óptima de los lotes de transferencia y el tiempo óptimo de inicio de las operaciones que minimice el costo total de producción que incluye el costo vinculado con el *makespan* y el transporte. Se modela un taller productivo compuesto por M centros de trabajos cada uno con una máquina, en el cual se realizan preparaciones anticipadas y no anticipadas e instrumentos de transporte con capacidad limitada. El modelo se aplicó a un caso real con 4 operaciones y además realizan 96 problemas de prueba para un caso de 3 máquinas y 16 para un caso de 4 máquinas basados en la combinación de los parámetros: tiempo y tipo de preparación y tiempo de procesamiento. Las conclusiones de este estudio demuestran que los parámetros relacionados con las actividades de transporte como el tiempo de transporte de los sublotos, el tiempo de regreso del transportador, el número de transportadores y su capacidad, tienen una influencia significativa sobre la solución óptima.

En el año 2005, Chiu y Chang³⁵ presentaron dos modelos de costos para el problema de *lot streaming* en un flowshop de cinco centros de trabajo dedicado a la fabricación de un sólo producto. Su estudio considera sublotos de igual tamaño entre ellos, sin interrupciones entre sublotos adyacentes en el mismo centro de trabajo. Se pretende determinar el tamaño óptimo de lote de procesamiento y el número óptimo de lotes de transferencia que minimizan el costo anual en cada modelo. El primer modelo de costos incorpora costos de preparación, costos de transporte de sublotos, costos de mantenimiento de los tres tipos de inventario y el

³⁴ CHIU, Huan; CHANG, Jen y LEE, Chia-Hsin. Lot streaming models with a limited number of capacitated transporters in multistage batch production systems. En: Computers and Operations Research. 2004, vol 31, p. 2003-2020.

³⁵ CHIU, Huan y CHANG, Jen. Cost models for lot streaming in a multistage flow shop. En: Omega. 2005, vol 33, p. 435-450.

costo de embarque del producto final. Como el costo total por año (en función del tamaño de lote y del número de sublotes) resulta ser una función convexa, la solución óptima se obtiene de las derivadas parciales de la función con respecto al tamaño del sublote y al número del sublote, después de igualar a cero cada una de ellas. El segundo modelo de costos tiene en cuenta los costos del modelo anterior, más los costos atribuidos al *makespan*. Para introducir el *makespan* en el segundo modelo se multiplica por el valor r , que representa el costo por minuto de producción. Los resultados fueron obtenidos de manera óptima por medio del método computacional LINGO, e indicaron que la tasa de costo de mantener inventario y el costo de preparación de máquinas tiene un impacto mucho mayor en la solución óptima que el costo de transporte de sublotes o el costo del envío del producto terminado. Así mismo, se observó que el valor del costo anual está directamente relacionado con el valor de r .

También en el 2005, Hoque y Goyal³⁶ plantean un procedimiento óptimo de solución para obtener el mínimo costo de la fabricación de un sólo trabajo en un sistema de múltiples etapas. Los costos a optimizar corresponden a la preparación, el transporte de material y el inventario en proceso. El procedimiento tiene en cuenta los tiempos de preparación, procesamiento, transferencia y regreso, así como la capacidad limitada del equipo transportador. El lote de producción puede ser fraccionado en tamaños continuos iguales o desiguales y el envío de cada lote incurre en un costo de transporte. Al final, el estudio muestra los porcentajes de reducción de costos alcanzados gracias al empleo de la técnica de *lot streaming*.

Una alternativa para modelar algunos problemas estocásticos de programación es la teoría de colas. La investigación realizada por Van Nieuwenhuyse y Vandaele³⁷,

³⁶ HOQUE, M. A.; GOYAL, S. K. On lot streaming in multistage production systems. En: International Journal of Production Economics, 2005, vol. 95, no 2, p. 195-202.

³⁷ VAN NIEUWENHUYSE, Inneke; VANDAELE, Nico. A queueing model for a two-stage stochastic manufacturing system with overlapping operations. En: International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2006, vol. 17, no 3, p. 175-199.

en el año 2006, se centra en una metodología de colas para un sistema de manufactura. Se plantea un modelo de costos con dos componentes principales: costo de mantenimiento de inventario y costo de manejo de materiales. Se comprueba la posibilidad de acelerar el flujo de la producción a lo largo del sistema gracias al fraccionamiento de lotes pero, se confirma el aumento en el manejo de materiales producto de esta técnica. Su estudio proporciona las expresiones analíticas que permiten cuantificar la compensación entre la disminución del tiempo de flujo y el aumento en el manejo de materiales. La configuración productiva estudiada es un open shop y está compuesta por dos centros de trabajo. Se realizan experimentos para dos ambientes de producción; en el primero, el centro de trabajo uno es un recurso cuello de botella, y en el segundo, se considera una configuración completamente balanceada. Los resultados demuestran que para configuraciones productivas como la del primer caso, el beneficio del fraccionamiento de lotes sobre el tiempo de flujo de los productos, es limitado. Además, que resulta más atractivo usar un elevado número de sublotes en configuraciones en las que el costo de manejo de materiales es bajo, o el costo de mantener inventario es alto.

En una investigación realizada por Sarin, Kalir y Chen³⁸, en el año 2008, se pretendía determinar el número óptimo de sublotes en un sistema productivo tipo flow shop por medio de un procedimiento de tiempo polinomial. El sistema analizado está compuesto por múltiples máquinas, procesa solo un lote de producción y se busca minimizar una función de costos asociados a diferentes criterios, principalmente de tiempos, como el *makespan*, tiempo medio de flujo, tiempos de preparación de máquina, tiempos de transferencia y el trabajo en proceso. Este estudio considera tamaños iguales para los sublotes entre las diferentes máquinas. A partir de los resultados se demuestra la efectividad del procedimiento para encontrar la solución óptima o muy cercana a ella.

³⁸ SARIN subhash, KALIR Adar y CHEN Ming. A single-lot, unified cost-based job shop lot-streaming problem. En: International Journal of Production Economics. 2008, vol. 113, p 413–424.

Adicionalmente, se presenta un análisis de los impactos relativos que tienen los pesos de los criterios usados en la función objetivo, sobre el número óptimo de sublotes.

Con el fin de caracterizar el flujo de los lotes de transferencia en un taller, Ye³⁹ propone en el 2009, un modelo de colas en una configuración tipo flow shop. En este modelo, los servidores son los agentes transportadores, los clientes son las partes a transportar, la llegada de los clientes corresponde a la salida de las máquinas procesadoras y el servicio consiste en el movimiento de las partes entre cada par de máquinas transportadoras. El agente transportador puede averiarse durante su operación y deber ser reparado inmediatamente. Durante su reparación, las máquinas procesadoras no detienen la producción y las partes del lote de transferencia deben esperar a ser atendidas. El modelo calcula el tamaño óptimo del lote de transferencia, basado en una función objetivo que incluye los costos de transporte, reparación, regreso y trabajo en proceso. Los ejemplos numéricos que se resuelven permiten ilustrar la utilidad de los métodos propuestos y se plantea el interés de replicar el análisis en un sistema de múltiples productos.

En el 2010, Huang⁴⁰ estudió el problema de la programación en un taller tipo flow shop con el uso de la técnica de fraccionamiento de lotes. La investigación propone un modelo que busca la minimización de los costos de inventario en proceso, máquina ociosa y transporte de sublotes para un taller con múltiples máquinas y varios productos. En este trabajo se usa el algoritmo colonia de hormigas como método de solución; el número de sublotes de transferencia toma los valores de 1, 2, 3 y 4 y se realizan pruebas para ambientes de producción de pequeña y gran escala con el mismo número de máquinas y número de productos, con el fin de probar la efectividad y robustez del algoritmo así como el beneficio de realizar fraccionamiento de lotes. El beneficio representa el porcentaje de

³⁹ YE, Taofeng. Queueing network analysis on dynamic lot streaming. En: Computers & Operations Research. 2009. Vol 36, p. 415 – 424.

⁴⁰ HUANG, Rong-Hwa. Multi-objective job-shop scheduling with lot-splitting production. En: International Journal of Production economics. 2010, vol. 124, p. 206-213.

reducción en el costo, producto del *lot streaming*. De esta investigación se concluye que para ambientes de producción de pequeña escala se logra un equilibrio entre los costos analizados con dos sublotes, mientras que, para los problemas de gran escala el número óptimo de sublotes es igual a tres.

6.3 MODELOS QUE INTEGRAN LOS ENFOQUES DE TIEMPO Y COSTO

En la tercera categoría se destaca el estudio de Guo y Fang⁴¹ en el cual desarrollan un modelo de optimización para una organización temporal de dos o más compañías independientes que se unen para compartir tecnología, información y recursos, denominada como “empresa virtual”. Esta investigación vincula modelos de costo y tiempo para buscar el tamaño óptimo de los lotes de proceso y lotes de transferencia en todas las estaciones (cuello y no cuello de botella) para un problema compuesto por 5 procesos y un solo producto. El modelo de costo incluye los costos relacionados con el transporte y la preparación, y el modelo de tiempo tiene en cuenta los tiempos de procesamiento, preparación y transporte de materiales. Se aplica un análisis jerárquico para priorizar los componentes de la función objetivo, de acuerdo a la importancia que cada uno de ellos posee en la empresa de aplicación. El método de solución seleccionado es un algoritmo genético.

En este estudio se aborda el problema con un enfoque de tiempo, debido al interés de evaluar el impacto del fraccionamiento de lotes sobre el tiempo de finalización de los trabajos, ya que esta variable tiene una relación directa con el tiempo de entrega al cliente y por lo tanto con el nivel de servicio ofrecido. Adicionalmente, el aprovechamiento de los recursos, es otra de las consecuencias del *lot streaming* que se desea estudiar, la cual se determina a partir del cálculo del tiempo ocioso.

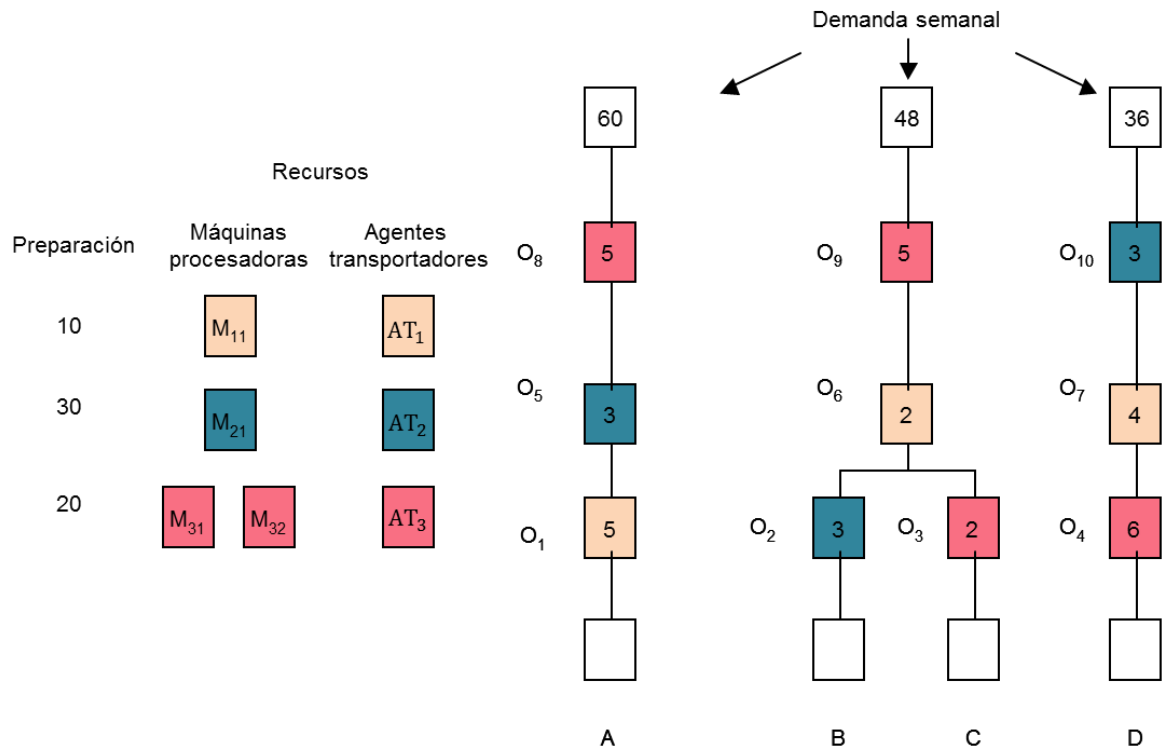
⁴¹ FANG, Zhi-mei. Mod GUO, Li-li. Modeling. Study of lot-sizing in virtual enterprise based on Multi-Objective. En: IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2011, p 933-937.

7. SISTEMA PRODUCTIVO OBJETO DE ESTUDIO

7.1 DESCRIPCIÓN

El sistema productivo a analizar, fue propuesto por Demeulemeester y Herroelen⁴², está dedicado a la producción de tres trabajos diferentes y compuesto por tres centros de trabajo; dos de ellos constituidos por una sola máquina y uno, constituido por dos máquinas del mismo tipo, como se muestra en la figura 1. En ésta se presentan los tiempos de preparación de las máquinas de proceso en la parte izquierda y los tiempos de procesamiento unitario dentro de los cuadros de color, frente al nombre de cada operación. Todos los tiempos se expresan en minutos.

Figura 1. Configuración productiva bajo estudio



⁴² DEMEULEMEESTER, Eric y HERROELEN, Willy. Modelling setup times, process batches and transfer batches using activity network logic. *En: European Journal of Operational Research* 89 (1996) pp. 355-365.

Para incorporar la consideración del transporte, se ha establecido que cada centro de trabajo cuenta con un agente transportador, que realiza la operación de transporte desde las máquinas del centro de trabajo al que ha sido asignado hasta la máquina que realiza la operación subsiguiente.

El flujo de los trabajos a lo largo del sistema está determinado por cuatro políticas de fraccionamiento, la primera consiste en la transferencia del lote de proceso completo, la segunda en el lote de proceso dividido en dos, y la tercera y cuarta política corresponden a transferencias de tres y cuatro sublotes, respectivamente. El tamaño de los sublotes es de carácter discreto y es igual entre todas las estaciones pero difiere entre productos. Los sublotes pertenecientes a un mismo producto deben procesarse de manera sucesiva y no se acepta tiempo ocioso entre su procesamiento. Para cada política el problema se modela por medio de programación lineal entera mixta, con el fin de minimizar el makespan. Se estudia el comportamiento de las variables de desempeño makespan y tiempo ocioso de los recursos, para tres niveles de demanda que afectan la carga productiva del sistema, con el fin de determinar el beneficio de cada política en escenarios de pequeña, mediana y gran escala de volúmenes de producción. Estos tres niveles se determinan aumentando la cantidad de piezas a procesar en factores de 100 y 1000. Además, se varía el porcentaje de participación de cada producto en la demanda agregada, para eliminar el efecto que esta pueda tener sobre la variable respuesta.

Se establece que las actividades de transporte son independientes del operador, es decir, el procesamiento no se verá interrumpido por la actividad de transporte. Cada actividad de transporte comprende la transferencia de material y el regreso del agente transportador vacío entre dos centros de trabajo. En los tiempos de transferencia está implicado el tiempo de desplazamiento del agente cargado, así como la carga y descarga de material, debido a que se considera que a mayor cantidad de piezas a transferir, mayor debe ser el tiempo destinado a la carga y la descarga de éstas.

Para representar esta dependencia, el tiempo de transferencia se ha establecido a similitud de Sancar y Ornek⁴³ quienes determinan que éste está formado por un componente fijo asociado a la distancia entre estaciones (se asume que las estaciones son equidistantes y por lo tanto, este componente no varía entre desplazamientos) y un componente variable asociado a la actividad de carga y descarga, el cual depende del número de unidades transportadas por sublote y el tiempo unitario asignado para la carga y descarga. De este modo, los tiempos de transporte varían en proporción al volumen de producción de cada escenario.

7.2 MODELADO POR PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA

Para resolver el problema de programación de operaciones en el sistema productivo bajo estudio, se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta basado principalmente en dos clases de restricciones:

- Restricciones de secuencia
- Restricciones de interferencia

Para incluir el tiempo de transporte dentro del modelo de programación lineal entera mixta, se considera la actividad de transporte como una operación. Adicionalmente, las variables de inicio de las operaciones en este modelo, se programarán por sublotes, debido a que la consideración del transporte genera nuevas restricciones que condicionan las relaciones entre los mismos. Se presenta la siguiente notación:

i, r: Trabajo

j, d: Operación.

s: Número del sublote

⁴³ SANCAR, Rahime y ORNEK, Arslan. Simulation analysis of lot streaming in job shops with transportation queue disciplines. En: Simulation Modelling Practice and Theory. 2009, vol 17, p. 442–453

k : Recurso donde se ejecuta la operación precedente. Máquina de proceso o agente transportador.

l : Recurso donde se ejecuta la operación siguiente. Máquina de proceso o agente transportador.

$TT(i, j, k)$: Parámetro tiempo de inicio más temprano posible

$TC(i, j, k)$: Tiempo de utilización continua del recurso. Para máquinas de proceso este tiempo corresponde al requerido para la finalización de todo un lote de producción incluido el tiempo de preparación, mientras que para agentes transportadores, este valor corresponde al tiempo de viaje de ida y regreso del transportador en un sólo movimiento.

$PS(i, j, k)$: Tiempo de procesamiento de un sublote. Para máquinas de proceso corresponde a la operación de las piezas de un sublote y para agentes transportadores el tiempo de requerido para mover un sublote de una estación a otra.

n : Número de sublotes de la política de fraccionamiento.

$X(i, j, k, s)$: Variable tiempo de inicio de la operación j del sublote s .

7.2.1 Restricciones de secuencia. Garantizan que el orden establecido entre dos operaciones sucesivas se cumpla de acuerdo a la ruta del producto, de tal manera que la operación siguiente sea programada una vez que haya transcurrido el tiempo necesario para finalizar la operación precedente. Estas restricciones pueden variar de acuerdo a la cantidad de máquinas disponibles en la operación precedente y siguiente.

RESTRICCIONES DE SECUENCIA TIPO I

Estas restricciones se utilizan para representar el caso en el que se dispone de una unidad de cada máquina, tanto en la operación precedente como en la siguiente.

$$X(i, j, k, s) + TT(i, j, k) \leq X(i, d, l, s) \quad \forall s = 1$$

Donde j corresponde a la operación precedente y d a la operación siguiente. Esta secuencia puede darse de máquina de proceso a agente transportador y viceversa. En la primera situación, el valor del tiempo más temprano corresponde a la preparación y el proceso del primer sublote; mientras que en la segunda, corresponde al tiempo de transporte de un sublote.

RESTRICCIONES DE SECUENCIA TIPO II

Estas restricciones se utilizan para representar el caso en el que se dispone de dos unidades de la máquina que realiza la operación precedente y sólo una de la que realiza la operación siguiente. Esta secuencia se presenta únicamente de máquinas de proceso a agente transportador.

$$X(i, j, k_1, s) + TT(i, j, k_1) \leq X(i, d, l, s) + M(1 - Y(i, j, k_1)) \quad \forall s = 1$$

$$X(i, j, k_2, s) + TT(i, j, k_2) \leq X(i, d, l, s) + M(1 - Y(i, j, k_2)) \quad \forall s = 1$$

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

k_1 : Máquina donde es posible ejecutar la operación precedente

k_2 : Máquina donde es posible ejecutar la operación precedente

Y : Variable binaria que toma el valor de 1 si la operación se ejecuta en esa máquina y 0 si se ejecuta en la otra.

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

La variable binaria Y establece a cuál de las dos máquinas le fue asignada la operación precedente. Entonces, si la operación se realiza en la segunda máquina en que es posible ejecutar la operación precedente, la variable $Y(i, j, k_2)$ toma el valor de 1, mientras que $Y(i, j, k_1)$ toma el valor de cero, lo cual hace que sólo se active la segunda ecuación y la primera sea redundante.

RESTRICCIONES DE SECUENCIA TIPO III

Estas restricciones se utilizan para representar el caso en el que se dispone de sólo una unidad del recurso que realiza la operación precedente y dos unidades del recurso que realiza la operación siguiente. Esta secuencia se presenta únicamente de agente transportador a máquinas de proceso.

$$X(i, j, k, s) + TT(i, j, k) \leq X(i, d, l_1, s) + M(1 - Y(i, d, l_1)) \quad \forall s = 1$$

$$X(i, j, k, s) + TT(i, j, k) \leq X(i, d, l_2, s) + M(1 - Y(i, d, l_2)) \quad \forall s = 1$$

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

l_1 : Máquina donde es posible ejecutar la operación siguiente

l_2 : Máquina dónde es posible ejecutar la operación siguiente

Y: Variable binaria que toma el valor de 1 si la operación se ejecuta en esa máquina y 0 si se ejecuta en la otra.

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

La binaria Y establece a cuál de las dos unidades se le va a asignar la operación siguiente. Por lo tanto, la tercera ecuación es necesaria para garantizar que sólo se active una de las restricciones anteriores, con el fin de asignar la operación a una sola unidad.

SECUENCIA ENTRE SUBLOTES DIFERENTES AL PRIMERO

Las restricciones descritas anteriormente, asignan los trabajos a las máquinas dependiendo de la secuencia existente. Por medio de ellas, se programa el inicio del primer sublote. Sin embargo, es necesario garantizar que para el resto de sublotes, se realice el transporte una vez cada sublote haya sido procesado, y que cada operación empiece cuando las piezas del sublote a procesar hayan sido transportadas a ese centro de trabajo.

$$X(i, j, k, s) + PS(i, j, k) \leq X(i, d, l, s) \quad \forall s > 1$$

SECUENCIA ENTRE SUBLOTES CONSECUTIVOS EN MÁQUINAS PROCESADORAS

Se formulan las siguientes restricciones con el propósito de impedir la aparición de espacios de tiempo ocioso durante el procesamiento de un lote de productos, es decir, provocar que la operación de todos los sublotes de un mismo trabajo se realice de manera continua. Para modelar la política de transferencia del lote completo se suprimen estas restricciones y para modelar la política de transferencia de dos sublotes, se suprime la segunda restricción.

$$\begin{aligned} X(i, j, k, s) + TT(i, j, k) &= X(i, j, k, s + 1) \quad \forall s = 1 \\ X(i, j, k, s) + PS(i, j, k) &= X(i, j, k, s + 1) \quad \forall s \neq 1, n \end{aligned}$$

SECUENCIA ENTRE SUBLOTES CONSECUTIVOS EN AGENTES TRANSPORTADORES

Se formula la siguiente restricción para asegurar que el transporte de los sublotes pertenecientes al mismo trabajo, se realice consecutivamente. Es decir, que el agente transporte el segundo sublote después de haber transportado el primero y así sucesivamente. Esta restricción debe suprimirse en el modelado de la primera política de fraccionamiento.

$$X(i, j, k, s) + TC(i, j, k) \geq X(i, d, l, s + 1) \quad \forall s \neq n$$

7.2.2 Restricciones de interferencia. Garantizan que las operaciones que se realizan en la misma máquina, no se programen de manera simultánea, puesto que cada máquina tiene la capacidad de procesar una sola operación a la vez. Estas restricciones pueden variar de acuerdo a la cantidad de unidades disponibles de cada tipo de máquina.

RESTRICCIONES DE INTERFERENCIA TIPO I

Se utilizan para representar el caso en que se dispone de una sola máquina del mismo tipo. Esta limitación se puede representar de forma general así:

$$M * Z(i, j, r, d, k) + X(i, j, k, s) - X(r, d, l, s) \geq TC(r, d, l)$$
$$M * (1 - Z(i, j, r, d, k)) + X(r, d, l, s) - X(i, j, k, s) \geq TC(i, j, k)$$

$Z(i, j, r, d, k)$: Variable binaria que toma el valor de 1 sí el trabajo (i, j) precede al trabajo (r, d) en la máquina k, no necesariamente de forma inmediata, y 0 de lo contrario.

Las desigualdades formuladas garantizan que exista un espacio de tiempo entre los tiempos de inicio de cada operación, el cual debe corresponder como mínimo al tiempo de utilización continua del recurso por la operación que se programa primero. Como las operaciones pueden ser programadas en diferente orden, es necesario formular dos posibilidades; una en la que se procese primero la operación d del trabajo r en la máquina k, y otra en la que se procese primero la operación j del trabajo i. Según este orden, la variable Z activa la desigualdad apropiada para el caso.

Para el problema específico bajo estudio, las restricciones se adaptan de la siguiente manera:

Para el caso de la interferencia en máquinas de proceso sólo es necesario restringir la interferencia entre los primeros sublotes de cada trabajo por un espacio mínimo del tiempo de procesamiento del lote completo, debido a que los siguientes sublotes no se van a interferir, gracias a la restricción de secuencia entre sublotes consecutivos en máquinas procesadoras.

$$M * Z(i, j, r, d, k) + X(i, j, k, s) - X(r, d, l, s) \geq TC(r, d, l) \quad \forall s = 1$$

$$M * (1 - Z(i, j, r, d, k)) + X(r, d, l, s) - X(i, j, k, s) \geq TC(i, j, k) \quad \forall s = 1$$

Por otro lado, la restricción de secuencia entre sublotes consecutivos en agentes transportadores garantiza que el transporte de sublotes de un mismo trabajo se realice de forma secuencial. Sin embargo, se hace necesario formular restricciones que combinen los sublotes de diferentes trabajos para evitar la interferencia entre todos los sublotes que procesa el agente transportador.

$$M * Z(i, j, r, d, k) + X(i, j, k, s) - X(r, d, l, s) \geq TC(r, d, l) \quad \forall s$$

$$M(1 - Z(i, j, r, d, k)) + X(r, d, l, s) - X(i, j, k, s) \geq TC(i, j, k) \quad \forall s$$

$$M * Z(i, j, r, d, k) + X(i, j, k, s) - X(r, d, l, s + 1) \geq TC(r, d, l) \quad \forall s$$

$$M(1 - Z(i, j, r, d, k)) + X(r, d, l, s + 1) - X(i, j, k, s) \geq TC(i, j, k) \quad \forall s$$

Las primeras dos restricciones evitan la interferencia entre sublotes de un mismo orden pertenecientes a diferentes trabajos y se utilizan en todas las políticas. Las dos últimas restricciones están formuladas para la política en la cual se dividen los trabajos en 2 sublotes y permiten crear un bucle entre la combinación de sublotes, es decir, que relacionan el primer sublote del trabajo i con el segundo sublote del trabajo r y el segundo sublote del trabajo i con el primero del trabajo r.

Si la política de fraccionamiento cambia a transportar tres sublotes, las dos últimas restricciones permiten que los sublotes queden relacionados así: 1-2, 2-3 y 3-1, donde el primer sublote pertenece al trabajo i y el segundo al trabajo r. Para formular la posibilidad de que se programe primero la operación del trabajo r, se deben agregar las siguientes dos restricciones para relacionar los sublotes así: 1-3, 2-1 y 3-2, donde el primer sublote pertenece al trabajo r y el segundo al trabajo i.

$$M * Z(i, j, r, d, k) + X(i, j, k, s) - X(r, d, l, s + 2) \geq TC(r, d, l) \quad \forall s$$

$$M(1 - Z(i, j, r, d, k)) + X(r, d, l, s + 2) - X(i, j, k, s) \geq TC(i, j, k) \quad \forall s$$

Cuando la política de fraccionamiento es de cuatro sublotes, de manera análoga, se deben adicionar dos restricciones más.

$$M * Z(i, j, r, d, k) + X(i, j, k, s) - X(r, d, l, s + +3) \geq TC(r, d, l) \quad \forall s$$

$$M(1 - Z(i, j, r, d, k)) + X(r, d, l, s + +3) - X(i, j, k, s) \geq TC(i, j, k) \quad \forall s$$

RESTRICCIONES DE INTERFERENCIA TIPO II

Estas restricciones se utilizan para representar el caso en que se dispone de más de una máquina del mismo tipo y sólo se plantean para máquinas procesadoras. La condición de interferencia se presenta únicamente cuando las operaciones se programan en la misma unidad de un tipo de máquina. Para la formulación de esta situación es necesario crear la variable binaria $W(i, j, r, d, k)$ que indique si efectivamente las operaciones se ejecutan en la misma unidad de un tipo de máquina, como se expone en la siguiente condición lógica:

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

$Y(i, j, k)$: Variable binaria que toma el valor de 1 si la operación se ejecuta en esa máquina y 0 en caso contrario.

$W(i, j, r, d, k)$: Variable binaria que toma el valor de 1 si efectivamente las operaciones se ejecutan en la misma unidad de un tipo de máquina y 0 en caso contrario.

Lo anterior, puede expresarse por medio de las siguientes restricciones:

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

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

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

Una vez se ha establecido la condición anterior, se formulan las restricciones de interferencia, las cuales van a depender del valor de la variable binaria W . Así, si esta variable toma el valor de 1, las operaciones se programan en la misma unidad y se debe activar la restricción de interferencia, pero si toma el valor de 0,

no existe interferencia entre las operaciones y por lo tanto la restricción debe omitirse.

$$X(i, j, k) - X(r, d, k) + A * U(i, j, r, d, k) \geq TC(r, d, k) + A \quad \forall s = 1$$

$$X(i, j, k) - X(r, d, k) - (M + B) * U(i, j, r, d, k) \leq TC(r, d, k) - B \quad \forall s = 1$$

$$X(r, d, k) - X(i, j, k) + A * V(i, j, r, d, k) \geq TC(i, j, k) + A \quad \forall s = 1$$

$$X(r, d, k) - X(i, j, k) - (M + B) * V(i, j, r, d, k) \leq TC(i, j, k) - B \quad \forall s = 1$$

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.

Adicionalmente, para garantizar que sólo se activen un par de estas ecuaciones, se formulan las siguientes restricciones para las variables binarias.

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

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

7.2.3 Medidas de desempeño. Para calcular la medida a optimizar, que corresponde al makespan, se debe formular una restricción para el instante de finalización de la última operación de cada trabajo. La última operación de los trabajos 1 y 2 se realiza en un tipo de máquina de la cual existen dos unidades, mientras que la última operación del trabajo 3 se realiza en una máquina de la cual se dispone de una sola unidad, por esta razón se deben formular una restricción para cada situación:

Min T

$$X(i, z, k, s) + TC(i, z, k) \leq T * M(1 - Y(i, j, k)) \quad \forall s = 1 \forall j = 1, 2$$

$$X(i, z, k, s) + TC(i, z, k) \leq T \quad \forall s = 1 \forall j = 3$$

T: Variable que representa la terminación del proceso

z: Última operación de un trabajo

Estas restricciones establecen que la variable T debe ser mayor o igual a todos los instantes de finalización de la última operación de cada trabajo. Como esta variable debe minimizarse, su valor será óptimo y corresponderá al instante de salida del último trabajo en el taller.

Por otro lado, se desea conocer el tiempo durante el cual los recursos permanecen inactivos a lo largo del tiempo total de operación. Esta medida se conoce como tiempo ocioso y se calcula de forma separada para las máquinas de proceso y los agentes transportadores.

$$2 * T - \sum_i \sum_j (TC(i,j,k) * Y(i,j,k)) = TOM2 \quad \forall k = m31, m32$$

$$2 * T - \sum_i \sum_j TC(i,j,k) = TOM1 \quad \forall k = m11, m21$$

$$TOM = TOM1 + TOM2$$

$$3 * T - n * \sum_i \sum_j TC(i,j,k) = TOT \quad \forall k = at1, at2, at3$$

TOM: Variable que representa el tiempo ocioso de las máquinas de proceso.

TOM1: Variable que representa el tiempo ocioso de las máquinas de proceso de las que sólo se dispone de una unidad.

TOM2: Variable que representa el tiempo ocioso de las máquinas de proceso de las que se dispone de dos unidades.

TOT: Variable que representa el tiempo ocioso de los agentes transportadores.

En el anexo A se presenta la formulación del modelo descrito anteriormente en el lenguaje de GAMS, para la cuarta política de fraccionamiento.

8. DISEÑO EXPERIMENTAL

8.1 RECONOCIMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Esta fase del diseño se presentó previamente en el capítulo 4, donde se expone las características de la configuración productiva, las actividades de transporte y los supuestos a considerar. A partir de la contextualización del problema se ha determinado que los factores que pueden influir en el desempeño del sistema son: la política de fraccionamiento, el volumen de producción y la mezcla de productos.

8.2 SELECCIÓN DE FACTORES Y SUS NIVELES

8.2.1 Política de fraccionamiento. El análisis de su efecto es el de mayor interés en esta investigación puesto que refleja el beneficio de implementar el fraccionamiento de lotes en un sistema productivo. Los niveles en este factor son fijos y se enuncian a continuación:

- *Lote de transferencia igual al lote de proceso:* La transferencia de material se realiza una vez que el lote de proceso se ha finalizado en su totalidad en la máquina precedente.
- *Lote de transferencia equivalente a la mitad del lote de proceso:* Para esta política, el traslado de productos de una operación a otra se realiza cuando se haya completado el procesamiento de la mitad del lote de proceso y al final del procesamiento del lote completo.
- *Lote de transferencia igual a la tercera parte del lote de proceso:* Esta política establece que se realizan tres transferencias entre operaciones para cada lote de proceso; la primera cuando la tercera parte de los productos del lote se ha procesado, la segunda cuando se han completado dos terceras partes, y la última cuando todos los productos se terminan.

- *Lote de transferencia igual a la cuarta parte del lote de proceso*: Esta política establece que se realizan cuatro transferencias entre operaciones para cada lote de proceso, de igual forma que en las políticas anteriores.

8.2.2 Volumen de producción. Este factor puede afectar la variable respuesta debido a que representa la carga del sistema productivo, es decir, la cantidad de piezas que debe procesar el taller. Cabe resaltar que su efecto sobre el makespan no es el principal interés de esta investigación dado que es un resultado inherente al aumento en el número de productos a fabricar. Sin embargo, su interacción con el factor política de fraccionamiento es un aspecto importante en el estudio, debido a que es posible que el efecto de la aplicación de diversas políticas de fraccionamiento no sea el mismo para diferentes niveles de demanda dados.

En resumen, se desea analizar el comportamiento de la variable de desempeño, a medida que la carga productiva del sistema aumenta y, de esta manera, conocer la conveniencia de cada política de fraccionamiento en escenarios de pequeña, mediana y gran escala de volúmenes de producción. Los niveles establecidos para este factor corresponden a la demanda básica, demanda básica por 100 y demanda básica por 1000. En la figura 1 se presentó la demanda básica para cada trabajo.

8.2.3 Mezcla de productos. Finalmente, se desea replicar el experimento con el fin de incrementar la precisión en los resultados y de estimar el error experimental, es decir, determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente diferentes. Para este caso particular en el que los parámetros son determinísticos y los niveles de los diferentes factores son fijos, el experimento se replica mediante la variación de la participación de cada producto dentro de la demanda agregada. Aunque no existe un interés por analizar el efecto de la mezcla de productos en el desempeño del sistema, es necesario bloquearlo para que su influencia no altere el efecto de los tratamientos. Para este

experimento, se ha establecido que los sublotos deben ser de carácter discreto, por lo cual el número de productos de cada trabajo debe ser divisible en el número de sublotos de cada política de fraccionamiento. Se asignan doce mezclas que representan el número de permutaciones que cumplen con la condición anterior, manteniendo la demanda agregada. La proporción de participación de cada producto es igual para los diferentes niveles de demanda, de tal forma que varía el número de artículos en factores de 100 o 1000, según cada caso.

Tabla 3. Mezclas de productos en los diferentes niveles de demanda.

Mezcla	Demanda básica			Demanda básica x 100			Demanda básica x 1000		
	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3
1	60	48	36	6000	4800	3600	60000	48000	36000
2	60	36	48	6000	3600	4800	60000	36000	48000
3	48	36	60	4800	3600	6000	48000	36000	60000
4	48	60	36	4800	6000	3600	48000	60000	36000
5	36	60	48	3600	6000	4800	36000	60000	48000
6	36	48	60	3600	4800	6000	36000	48000	60000
7	72	48	24	7200	4800	2400	72000	48000	24000
8	72	24	48	7200	2400	4800	72000	24000	48000
9	48	24	72	4800	2400	7200	48000	24000	72000
10	48	72	24	4800	7200	2400	48000	72000	24000
11	24	72	48	2400	7200	4800	24000	72000	48000
12	24	48	72	2400	4800	7200	24000	48000	72000

8.3 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA

Las variables dependientes seleccionadas para este experimento son: el tiempo de finalización de los productos, es decir, el makespan; y la capacidad ociosa de los recursos.

- Makespan

Representa el instante de finalización de la última pieza en un escenario productivo. Se selecciona esta medida como variable respuesta debido a que su

desempeño tiene una relación directa con los tiempos de entrega al cliente y con la utilización eficiente de los recursos en el sistema productivo. Adicionalmente, como se observa en el capítulo 3, diferentes trabajos de investigación demuestran la minimización del makespan por medio de la aplicación de la técnica de fraccionamiento de lotes y algunos beneficios obtenidos a partir de ello, sin embargo, no se han realizado análisis estadísticos sobre la significancia de dichas reducciones.

- Capacidad ociosa

En el capítulo 4 se mencionó el tiempo ocioso como medida de desempeño de la programación óptima. Este tiempo representa el período durante el cual los recursos permanecen inactivos y es un aspecto importante de la programación de operaciones, teniendo en cuenta que los recursos limitan la capacidad de producción del taller y por lo tanto, lograr un máximo aprovechamiento de los mismos permitirá que el taller tenga mayor capacidad de respuesta ante las exigencias del mercado.

En esta investigación se desea determinar el efecto de la técnica de *lot streaming* sobre el tiempo ocioso de los recursos; sin embargo, existe una relación de dependencia entre la magnitud del makespan y la de esta medida, puesto que en cada cambio de política de fraccionamiento, la reducción del makespan produce una disminución en el tiempo ocioso de los recursos. Para conocer el comportamiento de la ociosidad de los recursos, aislando la reducción del makespan, se realiza el análisis sobre el indicador de capacidad ociosa, que representa la fracción del tiempo total de producción durante el cual los recursos permanecen inactivos.

Tiempo ocioso = Makespan – Tiempo de utilización del recurso

$$\text{Capacidad ociosa} = \frac{\text{Tiempo ocioso}}{\text{Makespan}}$$

Este indicador se analiza de forma separada para los dos tipos de recursos disponibles, máquinas de proceso y agentes transportadores, debido a que el *lot streaming* afecta de manera diferente las actividades de producción y transporte.

8.4 SELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

A partir de los factores seleccionados anteriormente, de sus niveles y las características de los mismos; el diseño experimental que resulta más conveniente es un diseño factorial de dos factores con un bloque. Para este caso, se realizan todas las combinaciones posibles de los niveles de los dos factores principales para todos los niveles del factor bloque, que suman 144 en total (4 políticas de fraccionamiento x 3 niveles de demanda x 12 mezclas de productos). El modelo lineal que representa este tipo de diseño se describe a continuación:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \delta_k + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Donde μ es el efecto promedio global, τ_i es el efecto del nivel i -ésimo del factor política de fraccionamiento, 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 fraccionamiento y la demanda, δ_k representa el efecto del factor bloque k , en este caso la mezcla de productos y ε_{ijk} es el componente del error aleatorio. Este modelo matemático asume que no existe interacción entre el factor bloque y los tratamientos.

El principal objetivo de este diseño factorial es probar hipótesis sobre la igualdad de los efectos de los dos factores principales: política de fraccionamiento y demanda, así como del efecto de su combinación. La hipótesis sobre los factores política de fraccionamiento y demanda establece que las medias de las poblaciones definidas por sus niveles son iguales, es decir, que el efecto del factor es nulo, es decir:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4$$

Ha : Al menos una $\tau_i \neq 0$

Ho : $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$

Ha : Al menos una $\beta_i \neq 0$

En cuanto a la interacción existente entre los factores política de fraccionamiento y demanda, la hipótesis establece que su efecto es nulo y se escribe como sigue:

Ho : $(\tau\beta)_{ij} = 0 \forall i, j$

Ha : Al menos una $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$

8.5 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

8.5.1 Parametrización del modelo. Para llevar a cabo el procesamiento de datos, se deben estimar los parámetros correspondientes al tiempo de producción de un sublote, tiempo de utilización continua de un recurso y tiempo de inicio más temprano posible, para cada una de las 144 situaciones a analizar. Como se planteó en el modelado del problema, una operación puede referirse tanto al procesamiento de los productos en una máquina como al transporte de los mismos entre dos estaciones. Por lo tanto, el cálculo de los parámetros depende del tipo de operación que se esté considerando.

- Tiempo de procesamiento de un sublote “PS”

Este parámetro permite controlar que las operaciones de cada sublote se programen de acuerdo a la ruta establecida, es decir, que la operación de determinado sublote inicie únicamente cuando se ha terminado su operación en la estación precedente. En máquinas de proceso, PS corresponde al tiempo dedicado a la operación de todas las piezas pertenecientes a un mismo sublote.

$$PS = (\text{Procesamiento unitario}) * (\text{número de piezas del sublote})$$

Los tiempos de procesamiento unitario de las diferentes operaciones de cada trabajo, fueron presentados en la figura 1 y el número de piezas del subrote dependerá de la política de fraccionamiento y del nivel de demanda de cada situación.

A manera de ejemplo, se presentan los valores de este parámetro para la política de fraccionamiento de cuatro sublotes, nivel de demanda básica y mezcla 1. Con el fin de facilitar la notación de las operaciones, se utilizará la designación de los índices usados en Gams, la cual está compuesta por tres partes; la primera se refiere al trabajo, la segunda a la operación y la tercera a la máquina en la cual se realiza. De esta manera, el código t1.o1.m11 se refiere a la operación 1 del trabajo 1 en la máquina 11.

Tabla 4. Parámetro PS para operaciones en máquina de proceso

Designación en Gams	Procesamiento Unitario	Piezas por subrote	PS
t1.o1.m11	5	15	75
t1.o5.m21	3	15	45
t1.o8.m31/ t1.o8.m32	5	15	75
t2.o2.m21	3	12	36
t2.o3.m31 / t2.o3.m32	2	12	24
t2.o6.m11	2	12	24
t2.o9.m31 / t2.o9.m32	5	12	60
t3.o4.m31 / t3.o4.m32	6	9	54
t3.o7.m11	4	9	36
t3.o10.m21	3	9	27

En agentes transportadores, este parámetro corresponde al tiempo requerido para mover un subrote de una estación a otra.

PS= Tiempo de viaje + (Tiempo unitario de carga y descarga)*(número de piezas del subrote).

Cuando los volúmenes de producción aumentan, este parámetro se ve afectado el aumento de piezas a cargar y descargar. El tiempo unitario de carga y descarga se establece como 0,25 minutos/pieza. Se asigna un tiempo de viaje igual a 5

minutos, el cual se mantendrá constante en todos los escenarios de producción ya que está asociado al desplazamiento que debe hacer el agente transportador.

Tabla 5. Parámetro PS para operaciones en agentes transportadores

Designación en Gams	Piezas por sublote	PS
t1.o1.at11	15	8,75
t1.o5.at21	15	8,75
t2.o2.at21	12	8
t2.o3.at31 / t2.o3.at32	12	8
t2.o6.at11	12	8
t3.o4.at31 / t3.o4.at32	9	7,25
t3.o7.at11	9	7,25

- Tiempo de utilización continua del recurso “TC”

Este parámetro es utilizado para evitar que exista interferencia entre las operaciones, es decir, que a un mismo recurso, le sea asignada más de una operación a la vez. En máquinas de proceso este tiempo corresponde al requerido para la finalización de todo un lote de producción incluido el tiempo de preparación. Este valor no cambia en las diferentes políticas de operación debido a que depende de la demanda de cada producto.

$$TC = \text{SETUP} + (\text{Procesamiento unitario} * \text{Demanda})$$

Tabla 6. Parámetro TC para operaciones en máquinas de proceso

Designación en Gams	Preparación	Procesamiento Unitario	Demanda	TC
t1.o1.m11	10	5	60	310
t1.o5.m21	30	3	60	210
t1.o8.m31/ t1.o8.m32	20	5	60	320
t2.o2.m21	30	3	48	174
t2.o3.m31 / t2.o3.m32	20	2	48	116
t2.o6.m11	10	2	48	106
t2.o9.m31 / t2.o9.m32	20	5	48	260
t3.o4.m31 / t3.o4.m32	20	6	36	236
t3.o7.m11	10	4	36	154
t3.o10.m21	30	3	36	138

En agentes transportadores, este valor corresponde al tiempo de viaje de ida y regreso del transportador en sólo un movimiento.

$$TC = (TM) + (TR)$$

TM: Tiempo de movimiento/transferencia de material. Equivalente al PS de los agentes transportadores.

TR: Tiempo de regreso del agente transportador vacío. Se establece de la misma magnitud que el tiempo de viaje, es decir, 5 minutos.

Tabla 9. Parámetro TC para operaciones en agentes transportadores

Designación en Gams	TM	TR	TC
t1.o1.at11	10	5	13,75
t1.o5.at21	10	5	13,75
t2.o2.at21	8,5	5	13
t2.o3.at31 / t2.o3.at32	8,5	5	13
t2.o6.at11	8,5	5	13
t3.o4.at31 / t3.o4.at32	6,5	5	12,25
t3.o7.at11	6,5	5	12,25

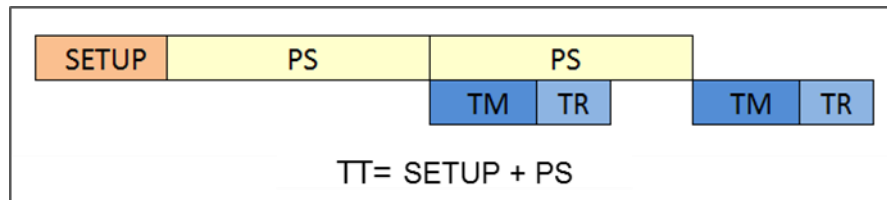
- Tiempo de inicio más temprano posible “TT”

La estrategia de fraccionamiento de lotes que se estudia en este modelo, permite que en determinado momento, una operación y su operación siguiente puedan ejecutarse de manera simultánea, puesto que para dar inicio a la operación siguiente, no es necesario esperar a la finalización de todas las piezas pertenecientes al lote, en la operación precedente. De este modo, el parámetro TT indica el tiempo mínimo necesario que debe transcurrir entre el inicio de dos operaciones sucesivas y se utiliza en el modelo para determinar el momento de inicio del primer sublote de la operación subsiguiente.

El cálculo de este intervalo de tiempo depende de la relación que exista entre las operaciones precedente y siguiente, como sigue:

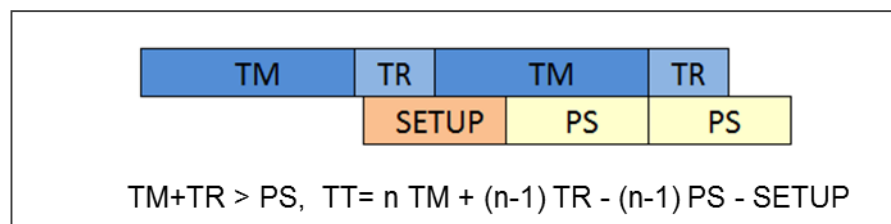
De operación en máquina procesadora a operación de transporte: Para dar inicio al primer movimiento de piezas de un lote, es necesario esperar a que en la operación precedente se realice la preparación de la máquina y el procesamiento del primer sublote, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. TT de proceso a transporte



De operación de transporte a operación en máquina procesadora: Como en el presente estudio se desea garantizar que el procesamiento de un lote sea continuo, es decir, que no existan tiempos ociosos entre sublotes de un mismo producto, el cálculo de este parámetro depende de la relación entre la duración de las operaciones precedente y siguiente. Así, cuando el tiempo total de transporte supera el tiempo de procesamiento del sublote, debe garantizarse que se procese el último sublote luego de haber realizado la transferencia de material del mismo, como se muestra en la figura 3.

Figura 3. TT de transporte a proceso cuando $TM+TR > PS$

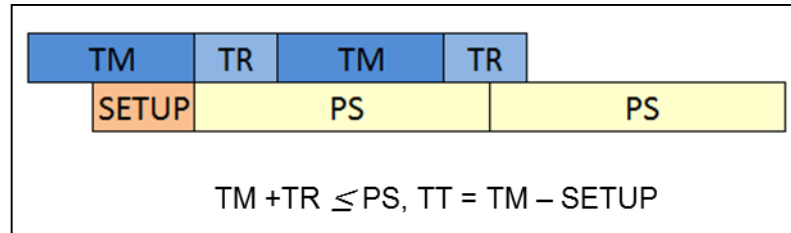


n: Número de sublotes de transferencia. Depende de la política de fraccionamiento de cada situación.

Por otro lado, cuando el tiempo total de transporte es menor al tiempo de procesamiento del sublote, se debe garantizar que se inicie el procesamiento del

primer sublote luego de haber realizado la transferencia de material del mismo. Esta situación se presenta en la figura 4.

Figura 4. TT de transporte a proceso cuando $TM+TR < PS$



En ambos casos, se permite que la preparación de las máquinas se realice de manera anticipada a la llegada de material. De este modo, el TT puede tomar un valor negativo cuando el tiempo de preparación es mayor al tiempo de movimiento de material, indicando que la operación siguiente deberá programarse antes de la operación precedente. Ver figura 5.

Figura 5. Preparación anticipada

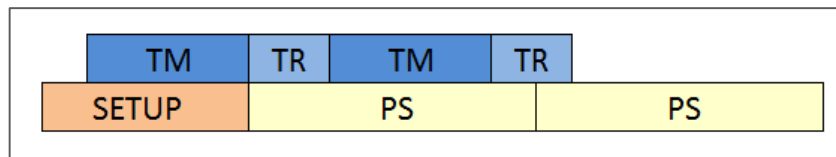


Tabla 7. Parámetro TT

Designación en Gams	TT proceso	Designación en Gams	TT transporte
t1.o1.m11	85	t1.o1.at11	-21,25
t1.o5.m21	75	t1.o5.at21	-11,25
t1.o8.m31/m32	95		
t2.o2.m21	95	t2.o2.at21	-12
t2.o3.m31 /m32	44	t2.o3.at31	-2
t2.o6.m11	34	t2.o6.at11	-12
t2.o9.m31/m32	80		
t3.o4.m31/m32	74	t3.o4.at31	-2,75
t3.o7.m11	46	t3.o7.at11	-22,75
t3.o10.m21	57		

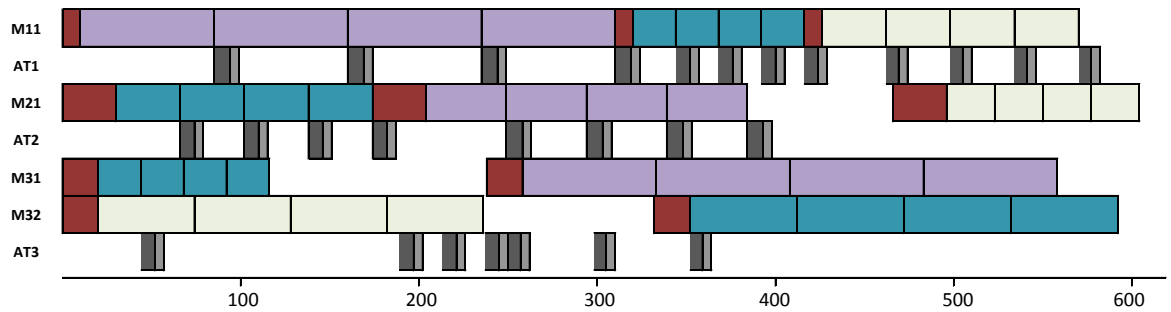
En los anexos B, C y D se presentan los parámetros descritos en este capítulo, para las 144 instancias a analizar.

8.5.2 Resultados obtenidos. Una vez formulados los modelos para cada una de las diferentes políticas, en el lenguaje de GAMS, y calculados los parámetros para cada una de las 144 instancias, se procede con el procesamiento individual de cada modelo por medio del optimizador CPLEX. La ejecución de un modelo genera un archivo de salida compuesto por varias partes: inicialmente, se presenta un listado de las ecuaciones y de las variables usadas en el modelo, organizadas de manera legible por el optimizador. En segundo lugar, se presentan dos informes. El primero contiene las estadísticas del modelo, es decir, información general del modelo como el número de ecuaciones y variables; y el tiempo requerido por el programa para generar el mismo. El segundo informe muestra el reporte de la solución, el cual es un resumen acerca del proceso de solución, el tipo de objetivo, el tipo de respuesta obtenida, el valor óptimo para la variable respuesta, entre otros.

Adicionalmente, el archivo de salida presenta información acerca del valor asignado a cada una de las variables del modelo, para el caso bajo estudio, se presenta el tiempo de inicio de la operación de cada sublote en cada una de las máquinas de proceso y de transporte. En el anexo E se presentan los informes generados para el modelo del anexo A, así como el valor asignado para la variable x correspondiente al tiempo de inicio de cada sublote.

A partir de estos resultados se elabora el diagrama de Gantt de la figura 6, que ilustra la programación del taller.

Figura 6. Diagrama de Gantt



Teniendo en cuenta que se desea conocer el tiempo ocioso en cada escenario, se incluyó su cálculo dentro del modelo y su valor también se muestra en el archivo de respuesta.

De esta manera, se procesaron las 144 instancias objeto de estudio y se generó una solución óptima para cada una de ellas. El anexo F agrupa los valores de makespan y tiempo ocioso correspondiente a cada escenario analizado.

9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

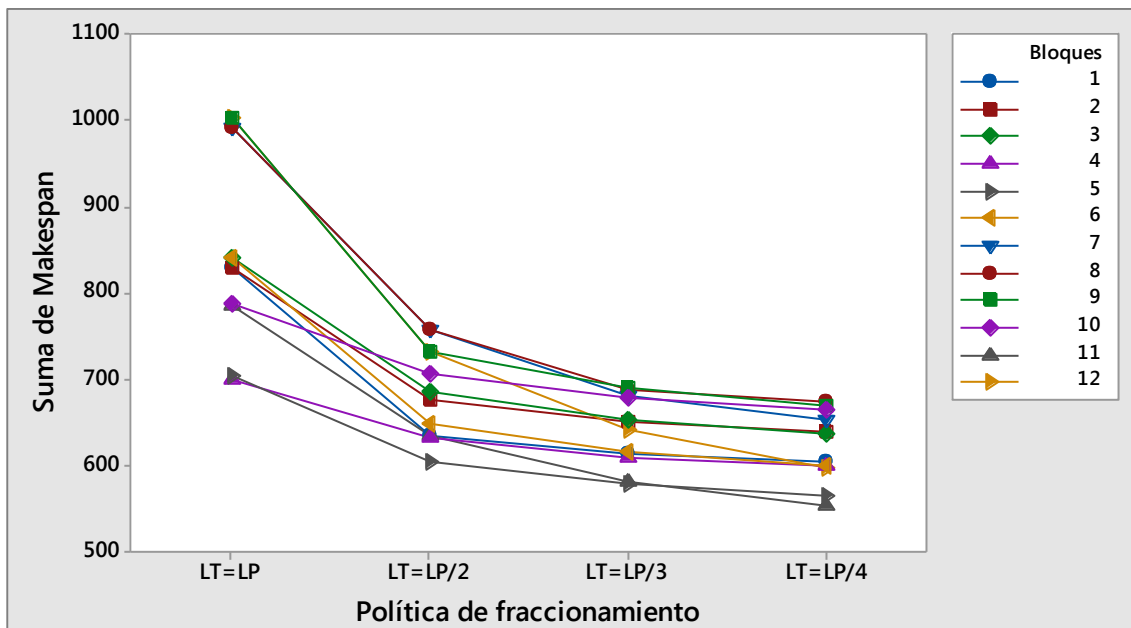
Una vez evaluadas todas las instancias, se introducen los datos en el software Minitab para realizar el análisis estadístico. El análisis se realiza individualmente para las tres variables dependientes establecidas, makespan, capacidad ociosa de máquinas y capacidad ociosa de agentes transportadores.

9.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE MAKESPAN

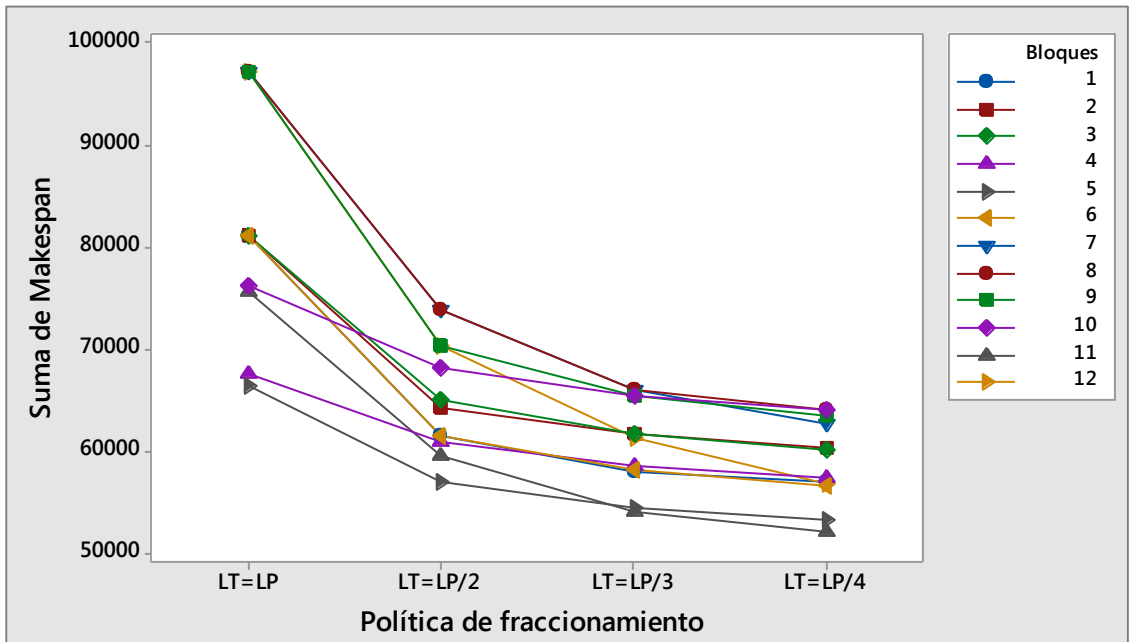
9.1.1 Análisis descriptivo. Inicialmente se realiza este análisis para ilustrar el comportamiento de la variable dependiente makespan bajo diferentes niveles de los factores definidos en el diseño experimental.

En las gráficas 1, 2 y 3, se describe para cada nivel de demanda por separado, el comportamiento del makespan en cada una de las mezclas de producto a medida que se modifican los niveles del factor política de fraccionamiento.

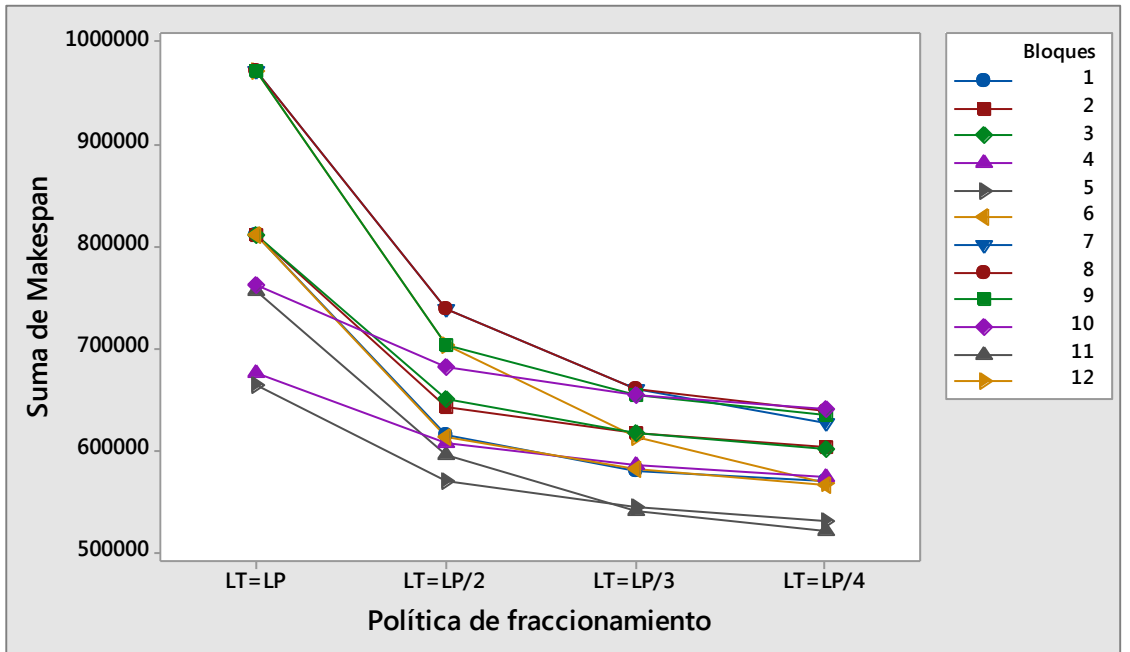
Gráfica 1. Makespan. Demanda básica.



Gráfica 2. Makespan. Demanda Básica*100



Gráfica 3. Demanda Básica*1000



De las gráficas anteriores, se puede inferir que la aplicación de la técnica de fraccionamiento de lotes produce una reducción en el makespan para los tres

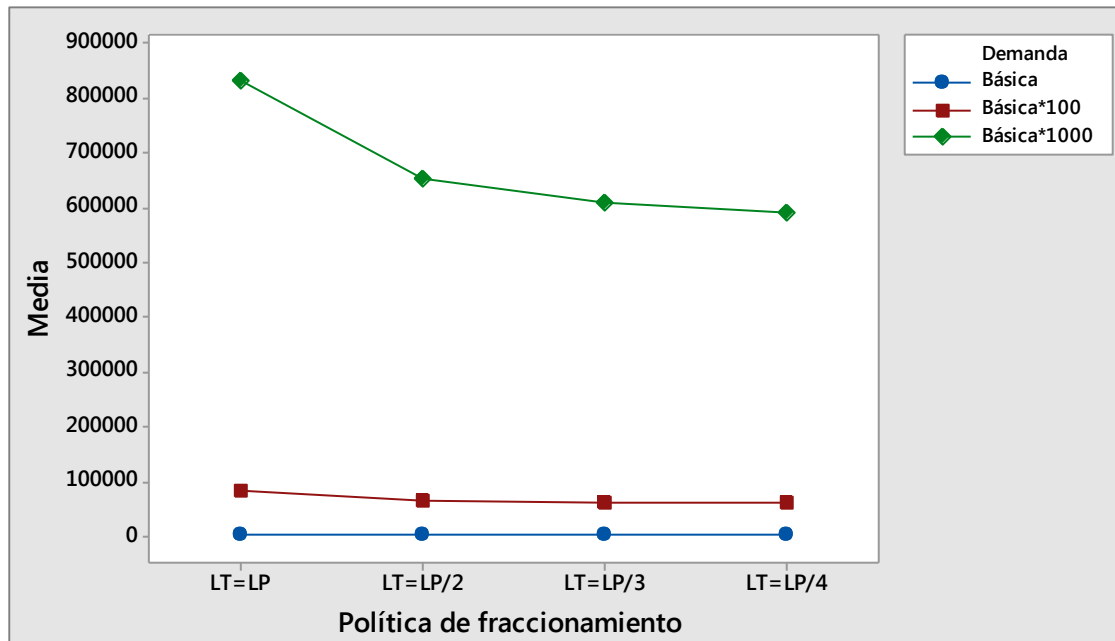
escenarios de producción: pequeña, mediana y gran escala. Se observa que en los tres escenarios, la reducción es mayor cuando se cambia de política de fraccionamiento de lote igual al lote de proceso, a lote de transferencia igual a la mitad del lote de proceso. A partir de la segunda política de fraccionamiento el cambio no parece ser considerable en comparación con el anterior, este indicio se comprobará más adelante por medio de comparaciones múltiples.

Otro aspecto que se puede apreciar, es la diferencia en el valor del makespan entre mezclas de productos. Debido a que cada producto tiene diferentes requerimientos de utilización de las máquinas disponibles en el taller, el porcentaje de participación de cada uno de ellos dentro de la demanda agregada incide en el valor de makespan, aun cuando la demanda agregada permanece constante, es decir se fabrica la misma cantidad de productos en total. Para explicar esta situación se analizan como ejemplo las mezclas 4 y 5, debido a que en las tres gráficas generan los menores valores para el makespan en el primer nivel de política de fraccionamiento. Es importante recordar que en estas mezclas, el trabajo 2 tiene la mayor participación en la demanda agregada y esto hace que el tiempo total de producción dependa de su finalización. Como el tiempo de ciclo de este trabajo es el menor de todos, el makespan es menor que el de las otras mezclas, incluso sin aplicar ninguna política de fraccionamiento. Lo anterior, justifica la inclusión de la variable mezcla de productos dentro del diseño como factor bloque.

Asimismo, en esta investigación existe interés por analizar la interacción entre el factor demanda y el factor política de fraccionamiento, es decir, cómo se comporta el makespan al pasar de una política a otra cuando varía el escenario de carga productiva. Para describir esta relación se elabora la gráfica 4. Se observa que en todos los niveles de demanda, se presenta disminución del makespan cuando se fraccionan los lotes de producción. La gráfica sugiere que para escenarios de grandes volúmenes de producción, el makespan se reduce en un mayor número de unidades de tiempo en comparación con los demás escenarios. Sin embargo,

esta reducción obedece a la proporción de unidades a producir en este nivel. Por lo tanto, este hecho no significa que la técnica genere resultados diferentes en cada nivel de demanda, puesto que en los tres escenarios productivos el comportamiento es consistente.

Gráfica 4. Makespan. Interacción entre demanda y política de fraccionamiento.



La tabla 8, presenta los estadísticos descriptivos de cada nivel de demanda, en los que se muestra la media, la desviación estándar, el rango y los valores mínimo y máximo, correspondientes a cada política de fraccionamiento. Esta información refleja el comportamiento observado en las gráficas anteriores, lo cual indica que los estadísticos son representativos del comportamiento de las diferentes mezclas de productos.

Adicionalmente, a partir de los valores de la desviación estándar y el rango, se observa que la dispersión de los datos es menor cuando se realiza fraccionamiento de lotes. Lo cual quiere decir que con esta técnica, el tiempo de producción depende en menor medida del tipo de mezcla que se presente. Esto sugiere la ventaja que representa la aplicación del *lot streaming* para reducir la

variabilidad en el desempeño del sistema, teniendo en cuenta que generalmente se obtiene una estimación más acertada en la planificación de la demanda agregada que de la demanda de cada producto. Por lo que se puede inferir que el fraccionamiento de lotes permite hacer más efectivo el proceso de planificación y control de la producción.

Tabla 8. Estadísticos descriptivos del makespan

Demanda	Política de fraccionamiento	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Rango
Demanda Básica	LT=LP	858,7	112,3	700	1002	302
	LT=LP/2	683,5	53,2	605	758	153
	LT=LP/3	639,9	39,9	579	689	110
	LT=LP/4	621,2	40,5	553	674	121
Demanda Básica*100	LT=LP	83227	11448	66340	97230	30890
	LT=LP/2	65467	5684	57035	73820	16785
	LT=LP/3	60881	4325	54040	66020	11980
	LT=LP/4	58956	4129	52075	64075	12000
Demanda Básica*1000	LT=LP	832027	114501	663040	972030	308990
	LT=LP/2	654404	56878	570035	738020	167985
	LT=LP/3	608531	43288	540040	660020	119980
	LT=LP/4	589281	41287	520525	640525	120000

9.1.2 Análisis de varianza. El análisis de varianza permite profundizar en el análisis estadístico ya que prueba las hipótesis planteadas en el diseño experimental, para determinar las fuentes de variación de la variable respuesta. Según el resumen de este análisis presentado en la tabla 9, el valor p de cada uno de los factores así como de sus interacciones no supera el nivel de significancia de 0.05, indicando que todos los efectos son significativos en el cambio del makespan.

Tabla 9. ANOVA del makespan.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	22	1,36042E+13	6,18372E+11	469,36	0,000
Bloques	11	61942199140	5631109013	4,27	0,000
Lineal	5	1,32747E+13	2,65495E+12	2015,18	0,000
Demanda	2	1,30964E+13	6,54820E+12	4970,27	0,000
Política	3	1,78353E+11	59450934600	45,12	0,000
Interacciones de 2 términos					
Demanda*Política	6	2,67485E+11	44580756830	33,84	0,000
Error	121	1,59414E+11	1317472697		
Total	143	1,37636E+13			

Sin embargo, para que el análisis de los resultados que se obtienen a partir del ANOVA sea válido, deben cumplirse los supuestos de independencia, normalidad y homocedasticidad. En el anexo G se presenta la verificación de estos supuestos y se evidencia el no cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad, por lo cual, se realizan diferentes transformaciones utilizadas para el ajuste de los datos a los supuestos, las cuales se muestran en el anexo H. Sin embargo, estas transformaciones no generan un resultado satisfactorio, por lo que se hace necesario hacer uso de las pruebas no paramétricas para evaluar estadísticamente si estos resultados siguen siendo válidos para los datos analizados.

9.1.3 Pruebas no paramétricas. Las pruebas no paramétricas son un procedimiento alternativo del análisis de varianza, cuando los datos no se ajustan a una distribución normal. Para determinar el efecto del factor política de fraccionamiento, se utiliza la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis que compara la diferencia entre grupos por medio de rangos en vez de medias.

Al no cumplirse las condiciones de normalidad, no se puede utilizar el promedio como medida de tendencia central por lo cual, las hipótesis planteadas deben sustituirse por:

H_0 : las medianas son todas iguales

H_1 : al menos una de las medianas es diferente

Teniendo en cuenta que en este estudio, el factor demanda sólo es de interés por el efecto de su interacción con el factor política y no de manera individual, la comparación de la diferencia entre medianas de las políticas de fraccionamiento, se realiza de forma separada para los diferentes niveles de demanda.

Tabla 10. Prueba de Kruskal Wallis para el makespan.

Factor Demanda	Factor Política	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z	H	GL	Valor p
Básica	1	12	835	41,7	4,9	28,88	3	0,000
	2	12	680,8	25,4	0,26			
	3	12	646,5	18	-1,87			
	4	12	620	13	-3,3			
	General	48		24,5				
Básica*100	1	12	81025	41,7	4,9	29,16	3	0,000
	2	12	64610	25,6	0,31			
	3	12	61433	18	-1,86			
	4	12	58755	12,8	-3,36			
	General	48		24,5				
Básica*1000	1	12	810025	41,7	4,9	29,16	3	0,000
	2	12	645785	25,6	0,31			
	3	12	614033	18	-1,86			
	4	12	587280	12,8	-3,36			
	General	48		24,5				

De acuerdo con la tabla 10, el valor absoluto de Z para el nivel 2 fue siempre el menor. Este valor indica que la clasificación de medias para este nivel es la que menos difiere de la clasificación de medias general, mientras que la clasificación de medias del nivel 1 es en la que existe mayor diferencia con el valor general. Los valores negativos de los niveles 3 y 4 indican que la clasificación de medias de estos niveles fueron menores a la general. Puede observarse que los valores de Z siguen un orden descendente, lo cual es coherente con el hecho de que fraccionar los lotes, contribuye a la disminución progresiva del makespan.

En los tres escenarios de volumen de producción, la estadística de prueba H tiene un valor p menor que el nivel de significancia de 0.05. Esto indica que debe

rechazarse la hipótesis nula en todos los niveles de demanda y aceptar que en cada uno, existe al menos un nivel de política de fraccionamiento que tiene mediana diferente, confirmándose así, la conveniencia que empíricamente se le atribuye a la aplicación de la técnica de fraccionamiento de lotes para mejorar el desempeño del sistema productivo.

9.1.4 Comparaciones múltiples. Una vez determinada la existencia del efecto del factor política de fraccionamiento, surge el interés por comprobar específicamente, entre cuáles de los niveles de este factor existe diferencia significativa. La prueba de Mann-Whitney ofrece una alternativa no paramétrica para realizar la comparación entre dos grupos cuando las poblaciones no siguen una distribución normal y las observaciones son independientes. Por lo tanto, en lugar de utilizar una prueba t de dos muestras, la cual examina la igualdad de medias, se elige probar la igualdad de las medianas entre los niveles i y j , utilizando la prueba de Mann-Whitney con $\alpha = 0.05$.

$$H_0: \eta_i = \eta_j$$

$$H_a: \eta_i \neq \eta_j$$

Cada vez que se hace una comparación entre grupos, existe la posibilidad de incurrir en el error Tipo I, es decir rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera para la población bajo estudio. Cuando el número de comparaciones es alto, la aplicación de este procedimiento en repetidas ocasiones con un nivel de significancia α dado, genera una alta probabilidad de rechazar la hipótesis nula aunque no existan diferencias reales entre los grupos. Para afrontar este problema, conocido como falsos positivos, se han desarrollado algunos procedimientos que adaptan el nivel de significancia para convertir las comparaciones múltiples en un análisis más conservador. Uno de los procedimientos para realizar esta corrección fue propuesto por Bonferroni y establece que el α usado para las comparaciones múltiples debe ser igual al nivel de significancia seleccionado, dividido entre el número total de comparaciones a

realizar ($\alpha^* = \alpha/nc$). En la tabla 11, se presentan los resultados de la prueba de Mann Whitney para las 6 comparaciones.

Minitab calcula para la diferencia en medianas de los grupos con un nivel de confianza de 99.17%. Cuando la estadística de prueba W tiene un valor p mayor que el nivel α elegido, se concluye que no existen evidencias suficientes para rechazar H_0 , por lo que, según puede observarse, el alfa corregido proporciona una exigencia mayor a la prueba.

Tabla 11. Prueba de Mann Whitney para el makespan.

Nivel de demanda	Política de fraccionamiento		W	Diferencia de medianas	Intervalo de confianza		Valor P
	i	j			Límite inferior	Límite superior	
Demanda Básica	LT=LP	LT=LP/2	212	159,2	66	315	0,0004 *
		LT=LP/3	222	202	107	350	0,0000 *
		LT=LP/4	222	228	121,5	366,2	0,0000 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	179	44	-18,03	107,02	0,0997
		LT=LP/4	194	64,50	-2,98	127,77	0,0120
	LT=LP/3	LT=LP/4	172,5	15,25	-27,99	80,27	0,2039
Demanda Básica*100	LT=LP	LT=LP/2	212	16790	6005	32245	0,0004 *
		LT=LP/3	222	20498	10205	35595	0,0000 *
		LT=LP/4	222	23620	12740	37120	0,0000 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	178	4210	-1790	12085	0,1121
		LT=LP/4	197	6300	75	13485	0,0072 *
	LT=LP/3	LT=LP/4	172	1710	-2965	8475	0,2145
Demanda Básica*1000	LT=LP	LT=LP/2	212	167990	60005	322495	0,0004 *
		LT=LP/3	222	204997	102005	355995	0,0000 *
		LT=LP/4	222	236245	127490	371245	0,0000 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	178	42010	-17990	120985	0,1121
		LT=LP/4	197	63000	750	134985	0,0072 *
	LT=LP/3	LT=LP/4	172	17123	-29740	84750	0,2145

*Existe diferencia significativa entre las políticas comparadas al nivel de 0,0083

Se observa que los datos apoyan la hipótesis de que para todos los niveles de demanda considerados, existe diferencia entre la mediana del nivel 1 y las demás.

Sin embargo, en los niveles de demanda aumentada también existe diferencia entre las políticas 2 y 4. Esta diferencia en los resultados puede obedecer a la existencia de interacción entre el factor demanda y factor política, lo que sugiere que la aplicación del fraccionamiento de lotes puede representar un beneficio diferente que depende del nivel de demanda estudiado. A partir de los resultados podría afirmarse que si se trata de un nivel de producción bajo, sólo vale la pena fraccionar el lote de producción en la mitad; pero si el fraccionamiento va a implementarse en un nivel de producción mayor, sería conveniente considerar la posibilidad de cambiar el fraccionamiento de dos a cuatro sublotes, siempre y cuando adoptar esta política supere en beneficios el esfuerzo adicional en manejo de materiales requerido en el taller.

En la tabla 12, se presentan los porcentajes de reducción entre las diferentes políticas, con el fin de conocer cuáles valores de reducción del makespan son determinantes para la mejora del desempeño del sistema. Se puede observar que el análisis estadístico determinó como significativas las reducciones superiores al 9.94%.

Es importante recordar que el fraccionamiento de lotes, requiere de aumento en el número de movimientos entre estaciones, por lo que el esfuerzo requerido en el control y manejo de materiales es mayor a medida que aumenta el número de sublotes de transferencia. Por lo tanto, no cualquier reducción en el makespan puede justificar la implementación de determinada política. Basarse en las conclusiones estadísticas es un buen método para determinar la justificación de la política a implementar para compensar el aumento en el esfuerzo requerido en el control y manejo de materiales con la mejora significativa en el desempeño del sistema. Sin embargo, es necesario tener en cuenta las características de manejo de materiales que surgen en el sistema específico.

Tabla 12. Porcentajes de reducción del makespan.

Nivel de demanda	Política i	Política j	Porcentaje de reducción
Demanda básica	LT=LP	LT=LP/2*	20,395%
		LT=LP/3*	25,476%
		LT=LP/4*	27,659%
	LT=LP/2	LT=LP/3	6,382%
		LT=LP/4	9,125%
	LT=LP/3	LT=LP/4	2,930%
Demanda básica*100	LT=LP	LT=LP/2*	21,339%
		LT=LP/3*	26,849%
		LT=LP/4*	29,162%
	LT=LP/2	LT=LP/3	7,005%
		LT=LP/4*	9,945%
	LT=LP/3	LT=LP/4	3,161%
Demanda básica*1000	LT=LP	LT=LP/2*	21,348%
		LT=LP/3*	26,862%
		LT=LP/4*	29,175%
	LT=LP/2	LT=LP/3	7,010%
		LT=LP/4*	9,951%
	LT=LP/3	LT=LP/4	3,163%

El control y manejo de materiales dentro del taller debe ser más ágil a medida que se aumenta el fraccionamiento de lotes, ya que el material se dispersa en las diferentes estaciones haciendo más difícil realizar el control físico adecuado sobre el almacenamiento de las existencias en inventario en proceso, así como el control de los movimientos del sistema de transferencia.

Cuando las anteriores actividades no se ejecutan eficientemente, el taller se expone a algunos riesgos, tales como retrasos en las entregas, desperdicio de tiempo de máquina, desorganización, ocurrencia de accidentes de trabajo en etapas de transporte, condiciones de almacenaje inadecuadas a causa de espacio

insuficiente, etc. Todos los riesgos descritos afectan la productividad y por tanto, deben ser tenidos en cuenta en el momento de seleccionar la política de fraccionamiento bajo la cual operará el sistema.

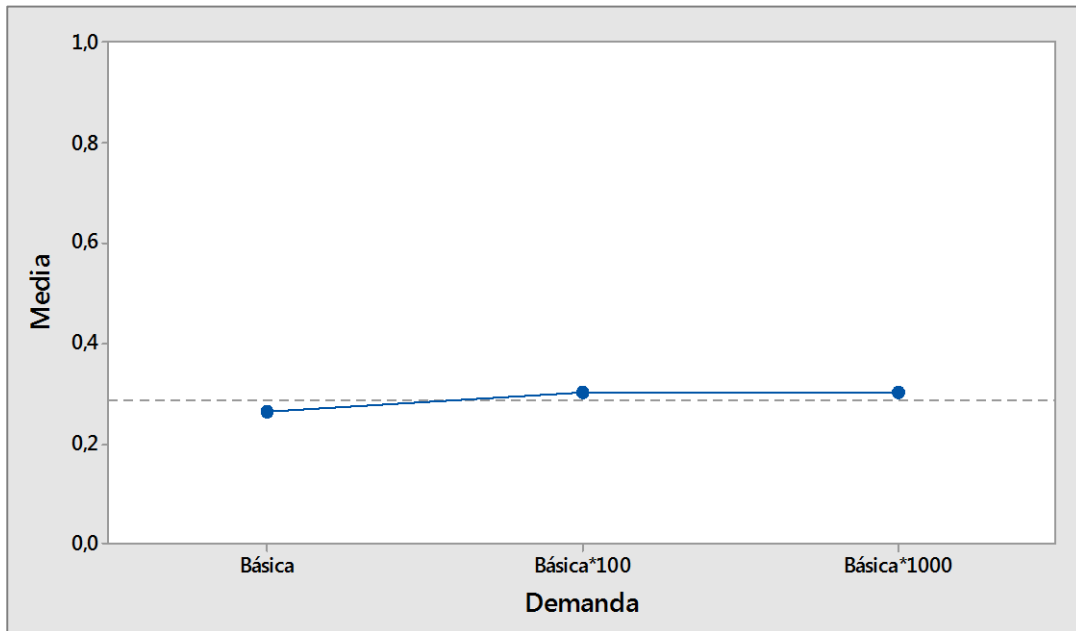
Debido a lo anterior, si se desea adoptar la técnica de *lot streaming* en el sistema productivo de pequeña escala, es recomendable seleccionar la segunda política de fraccionamiento, es decir, dividir el lote de proceso en dos sublotes, puesto que la disminución del makespan en las demás políticas no resulta ser significativamente diferente y en cambio, sí aumenta los riesgos enunciados anteriormente y exige mayor número de modificaciones y adecuaciones al sistema de control y manejo de materiales. De otra parte, si el volumen de producción es grande, cabe considerar el cambio a la cuarta política ya que sí hay diferencia significativa con la segunda política de fraccionamiento, y por tanto, valdría la pena realizar el esfuerzo adicional mencionado.

9.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD OCIOSA DE MÁQUINAS DE PROCESO

9.2.1 Análisis descriptivo. Este análisis se realiza para representar de manera general el comportamiento de la variable capacidad ociosa de las máquinas de proceso bajo los cambios de los factores establecidos. En este caso, el efecto de la demanda tampoco es el de principal interés pero se desconoce cómo puede afectar a este indicador; por esta razón, se presenta la gráfica 5 con el efecto principal del factor demanda sobre la capacidad ociosa.

En la gráfica se observa que los índices de capacidad ociosa en los escenarios de producción de demanda aumentada son similares y que, a su vez, son mayores que en el escenario de demanda básica. Esta situación puede deberse a que en el nivel de demanda básica, el tiempo de preparación de las máquinas tiene una mayor participación dentro del tiempo total de producción, lo que hace que en este nivel, el porcentaje de tiempo ocioso sea menor.

Gráfica 5. Efecto principal de la demanda para capacidad ociosa de máquinas.

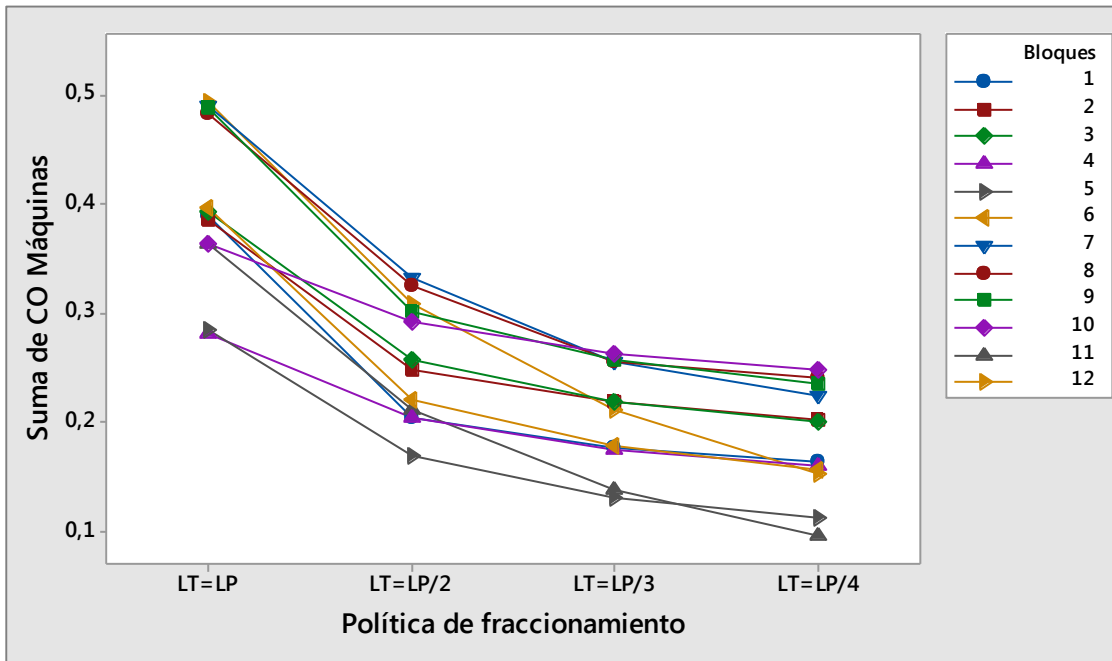


En las gráficas 6, 7 y 8, se describe el comportamiento de la capacidad ociosa de las máquinas de proceso en cada mezcla de productos, de acuerdo a los cambios de nivel del factor política de fraccionamiento. Este comportamiento se muestra para cada nivel de demanda por separado.

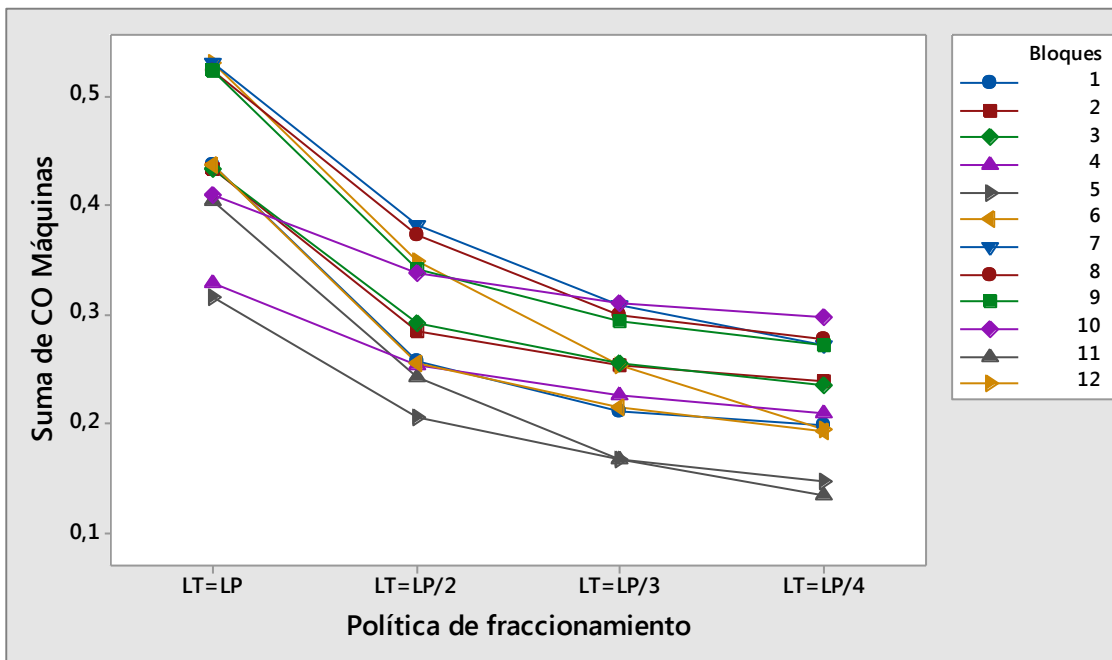
Se observa que en los tres niveles de demanda, este indicador toma valores menores a medida que aumenta el número de sublotos de transferencia, siendo mayor la disminución de la capacidad ociosa cuando se pasa de la primera a la segunda política de fraccionamiento.

Como se vislumbró en el análisis del makespan, el porcentaje de participación de los productos en la demanda agregada, incide en el tiempo total de producción y en los requerimientos de utilización de las máquinas, por lo que el indicador de capacidad ociosa también difiere dependiendo de la mezcla a procesar, lo cual demuestra que para esta variable fue acertado elegirla como un factor bloque.

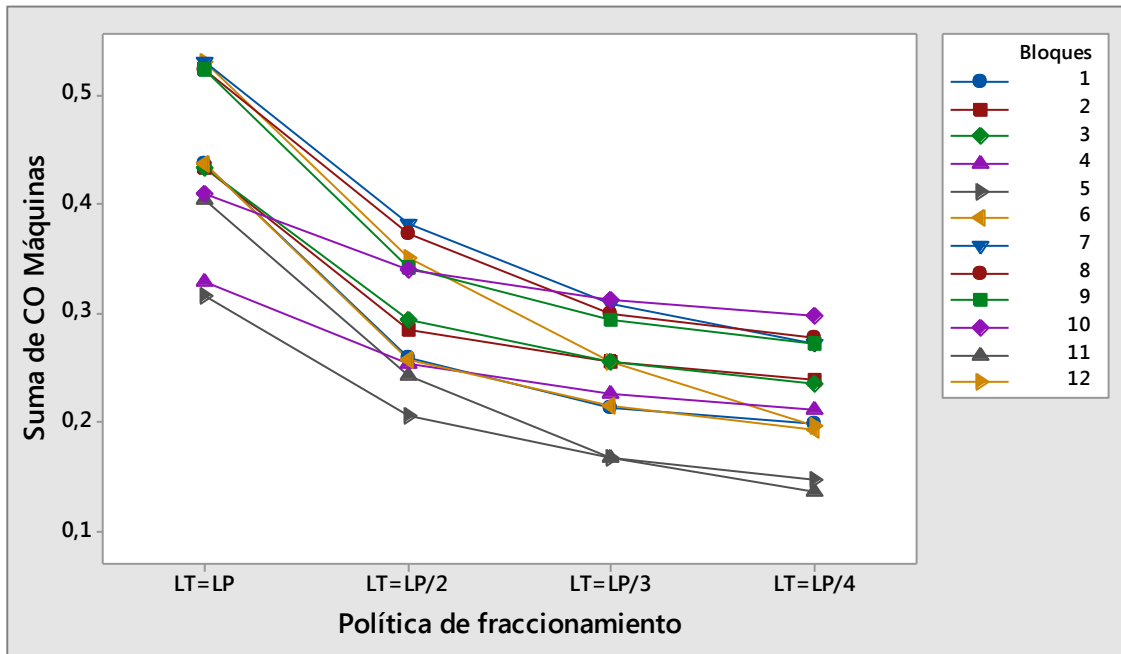
Gráfica 6. Capacidad ociosa de máquinas. Demanda básica.



Gráfica 7. Capacidad ociosa de máquinas. Demanda básica*100.



Gráfica 8. Capacidad ociosa de máquinas. Demanda básica*1000.



Por otro lado, como se planteó en el diseño de experimentos, se desea analizar la posible interacción entre el factor demanda y el factor política de fraccionamiento. La gráfica 9 describe esta situación, mostrando que en todos los niveles de demanda, la capacidad ociosa tiene el mismo comportamiento; a medida que se fraccionan los lotes de producción, este indicador disminuye. Este comportamiento sugiere que los efectos de los dos factores son aditivos y por lo tanto que no existe interacción, es decir que la técnica produce resultados consistentes entre los diferentes tratamientos del experimento. Asimismo, la gráfica sugiere que en escenarios de pequeña escala, existe una mayor utilización de los recursos que en los de grandes volúmenes de producción, lo cual ya se había observado en la gráfica del efecto principal de la demanda.

La tabla 13 agrupa los estadísticos descriptivos de la variable. El comportamiento de las medias, corresponde al ya observado en las gráficas anteriores, por lo que se concluye que es representativo del comportamiento de las diferentes mezclas de producto. Las medidas de dispersión permiten conocer la variación del valor de la capacidad ociosa bajo cambios en la mezcla de productos a fabricar. En este

sentido, la desviación estándar y el rango, demuestran que el fraccionamiento aumenta la certeza sobre la utilización de los recursos y por tanto se puede tener un menor margen de error en la planeación.

Gráfica 9. Capacidad ociosa de máquinas. Interacción entre demanda y política de fraccionamiento.

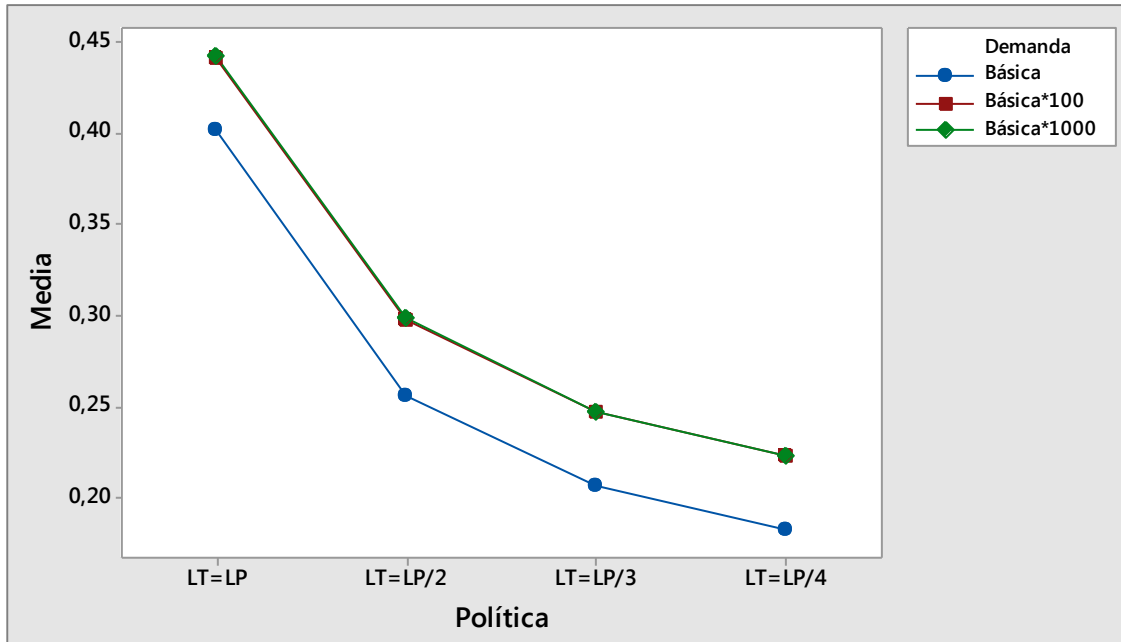


Tabla 13. Estadísticos descriptivos de la capacidad ociosa de máquinas

Demanda	Factor política	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Rango
Demanda Básica	LT=LP	0,4018	0,0753	0,2814	0,495	0,2136
	LT=LP/2	0,2558	0,0548	0,1686	0,3325	0,1639
	LT=LP/3	0,2066	0,0467	0,1313	0,2636	0,1324
	LT=LP/4	0,1824	0,0504	0,0958	0,2487	0,1528
Demanda Básica*100	LT=LP	0,4422	0,0742	0,3164	0,5305	0,2141
	LT=LP/2	0,2982	0,0574	0,2049	0,3816	0,1767
	LT=LP/3	0,2469	0,0511	0,1664	0,3114	0,1451
	LT=LP/4	0,2224	0,0519	0,1349	0,2969	0,162
Demanda Básica*1000	LT=LP	0,4426	0,0742	0,3167	0,5308	0,2141
	LT=LP/2	0,2986	0,0574	0,2052	0,3821	0,1768
	LT=LP/3	0,2473	0,0511	0,1666	0,3119	0,1452
	LT=LP/4	0,2228	0,0519	0,1354	0,2974	0,162

9.2.2. Análisis de varianza. Se realiza un análisis de varianza con el fin de probar las hipótesis planteadas en el diseño de experimentos, para estudiar el comportamiento de la variable de capacidad ociosa de máquinas de operación.

Tabla 14. ANOVA de la capacidad ociosa de máquinas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	22	1,46717	0,066690	90,83	0,000
Bloques	11	0,36864	0,033512	45,64	0,000
Lineal	5	1,09851	0,219702	299,24	0,000
Demanda	2	0,05365	0,026823	36,53	0,000
Política	3	1,04487	0,348288	474,37	0,000
Interacciones de 2 términos					
Demanda*Política	6	0,00003	0,000005	0,01	1,000
Error	121	0,08884	0,000734		
Total	143	1,55601			

El ANOVA de la tabla 14, señala que el valor p de los efectos principales del factor demanda, el factor política y el factor bloque, es menor que el nivel de significancia $\alpha=0.05$, lo cual indica que existe efecto de estos factores sobre la variable de capacidad ociosa de máquinas. Por otro lado, se puede notar que el valor p para la interacción entre la política y la demanda es superior a 0.05 y por lo tanto, su efecto es no significativo; lo que significa que la política de fraccionamiento reduce la capacidad ociosa de máquinas en igual medida para todos los niveles de demanda evaluados.

No obstante, tal como sucedió con el análisis de varianza del makespan, los resultados obtenidos deben ser validados por medio de pruebas no paramétricas debido al incumplimiento del supuesto de normalidad y los resultados obtenidos a partir de la transformación de los datos. Ver anexos G y H.

9.2.3 Pruebas no paramétricas. Es necesario recurrir nuevamente a las pruebas no paramétricas como método alternativo de análisis. Se aplica la prueba de Kruskal-Wallis de forma análoga al análisis del makespan, para determinar el

efecto de la política de fraccionamiento. Es decir, la comparación entre grupos se realiza individualmente para cada nivel de demanda.

Tabla 15. Prueba de Kruskal- Wallis para capacidad ociosa de máquinas.

Factor Demanda	Factor Política	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z	H	GL	Valor p
Básica	LT=LP	12	0,3922	41,7	4,9	29,66	3	0,000
	LT=LP/2	12	0,2523	26	0,43			
	LT=LP/3	12	0,215	17,8	-1,93			
	LT=LP/4	12	0,181	12,6	-3,4			
	General	48		24,5				
Básica*100	LT=LP	12	0,4347	41,7	4,9	29,43	3	0,000
	LT=LP/2	12	0,2888	25,9	0,4			
	LT=LP/3	12	0,2545	17,6	-1,98			
	LT=LP/4	12	0,2227	12,8	-3,33			
	General	48		24,5				
Básica*1000	LT=LP	12	0,4351	41,7	4,9	29,43	3	0,000
	LT=LP/2	12	0,2891	25,9	0,4			
	LT=LP/3	12	0,2548	17,6	-1,98			
	LT=LP/4	12	0,2232	12,8	-3,33			
	General	48		24,5				

La disminución del valor Z a medida que se cambia de política de fraccionamiento, indica que el *lot streaming* reduce la capacidad ociosa de los recursos. Como en los tres niveles de demanda, el valor p es menor que el nivel de significancia establecido $\alpha=0.05$, se rechaza la hipótesis de igualdad entre los niveles de política de fraccionamiento y por tanto, se concluye que la política produce un efecto significativo sobre la capacidad ociosa de las máquinas de proceso en todos los escenarios de producción.

9.2.4 Comparaciones múltiples. La prueba de Mann-Whitney se utiliza nuevamente, para probar la igualdad de las medianas entre cada par de niveles del factor política de fraccionamiento, con un nivel de significancia establecido de acuerdo a la corrección de Bonferroni equivalente a 0.0083.

De los resultados de la prueba de la tabla 16, se concluye que independientemente del nivel de demanda considerado, existe diferencia significativa entre la mediana del nivel 1 y las demás, y entre las medianas de los niveles 2 y 4. Este resultado indica la no existencia de interacción entre los factores política y demanda, en la variable de capacidad ociosa de máquinas.

Tabla 16. Prueba de Mann Whitney para capacidad ociosa de máquinas.

Nivel de demanda	Factor política		W	Diferencia de medianas	Intervalo de confianza		Valor P
	i	j			Límite inferior	Límite superior	
Demanda Básica		LT=LP/2	212	0,157	0,0633	0,2335	0,0004 *
	LT=LP	LT=LP/3	222	0,19872	0,10909	0,27202	0,0000 *
		LT=LP/4	222	0,2304	0,1314	0,2982	0,0000 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	181	0,04461	-0,01497	0,11690	0,0783
		LT=LP/4	199	0,07057	0,00379	0,14509	0,0051 *
		LT=LP/3LT=LP/4	172	0,01995	-0,03132	0,09599	0,2145
Demanda Básica*100		LT=LP/2	212	0,1508	0,0594	0,2375	0,0004 *
	LT=LP	LT=LP/3	222	0,2023	0,1136	0,2747	0,0000 *
		LT=LP/4	222	0,2270	0,1359	0,3017	0,0000 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	182	0,04374	-0,02025	0,12592	0,0690
		LT=LP/4	197	0,06997	0,00370	0,14640	0,0073 *
		LT=LP/3LT=LP/4	171	0,02134	-0,04303	0,09860	0,2366
Demanda Básica*1000		LT=LP/2	212	0,1507	0,0594	0,2375	0,0004 *
	LT=LP	LT=LP/3	222	0,2024	0,1137	0,2748	0,0000 *
		LT=LP/4	222	0,2269	0,1359	0,3016	0,0000 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	182	0,04383	-0,02039	0,12602	0,0690
		LT=LP/4	197	0,06992	0,00361	0,14638	0,0073 *
		LT=LP/3LT=LP/4	171	0,02129	-0,04319	0,09865	0,2366
*Existe diferencia significativa entre las políticas comparadas al nivel de 0,0083							

Para identificar la reducción de esta variable en cada cambio de nivel de demanda, se presenta la tabla 17. De acuerdo con el análisis estadístico, las reducciones significativas en la capacidad ociosa son aquellas mayores al 25.38%, indicando que si el tomador de decisiones tiene en cuenta este beneficio adicional que provee la técnica sobre la utilización de las máquinas de proceso, se podría justificar el cambio de la segunda a la cuarta política de fraccionamiento.

De lo anterior, se puede concluir que además de reducir el tiempo de finalización de los trabajos (makespan), lo cual se traduce en un valor agregado para el cliente; el fraccionamiento de lotes reduce la pérdida del tiempo productivo de máquinas, lo cual significa que se eleva la eficiencia de la planta, permitiendo que en un determinado periodo de tiempo se pueda incrementar el nivel de producción manteniendo constantes los costos fijos (referentes a la maquinaria) y de esta forma, ampliar el margen de utilidad.

Tabla 17. Porcentaje de reducción de la capacidad ociosa de máquinas.

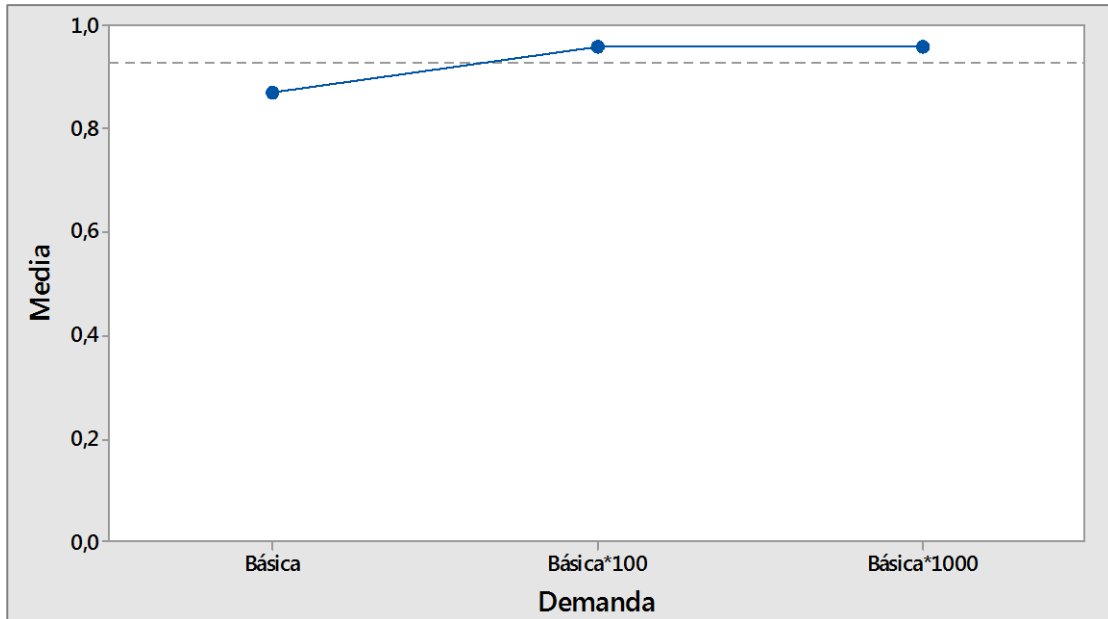
Nivel de demanda	Política i	Política j	Porcentaje de reducción
Demanda básica	LT=LP	LT=LP/2*	36,317%
		LT=LP/3*	48,570%
		LT=LP/4*	54,597%
	LT=LP/2	LT=LP/3	19,240%
		LT=LP/4*	28,705%
	LT=LP/3	LT=LP/4	11,720%
Demanda básica*100	LT=LP	LT=LP/2*	32,577%
		LT=LP/3*	44,175%
		LT=LP/4*	49,712%
	LT=LP/2	LT=LP/3	17,202%
		LT=LP/4*	25,414%
	LT=LP/3	LT=LP/4	9,918%
Demanda básica*1000	LT=LP	LT=LP/2*	32,544%
		LT=LP/3*	44,135%
		LT=LP/4*	49,666%
	LT=LP/2	LT=LP/3	17,183%
		LT=LP/4*	25,382%
	LT=LP/3	LT=LP/4	9,901%

9.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CAPACIDAD OCIOSA DE AGENTES TRANSPORTADORES

9.3.1 Análisis descriptivo. El comportamiento de la variable capacidad ociosa de los agentes de transporte bajo los cambios de los factores establecidos, va a ser analizado dada la importancia que tiene la consideración del transporte en el

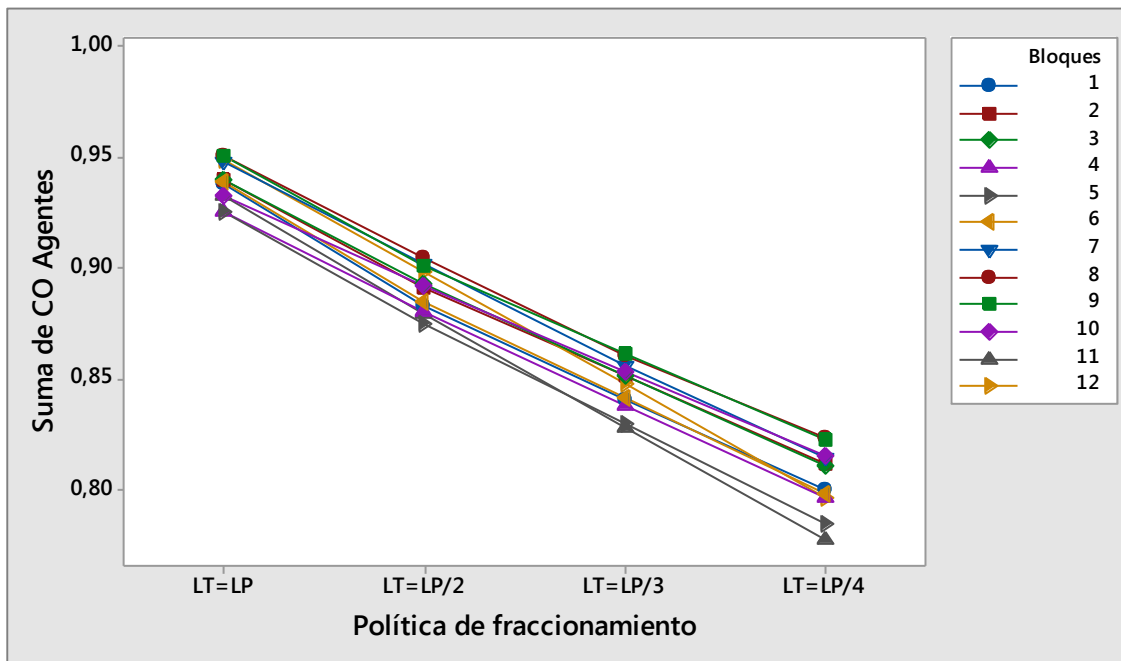
estudio de la técnica de *lot streaming*. La gráfica 10 presenta el efecto principal la demanda sobre la capacidad ociosa, para conocer como este factor afecta la variable.

Gráfica 10. Efecto principal de la demanda para capacidad ociosa de transportadores.

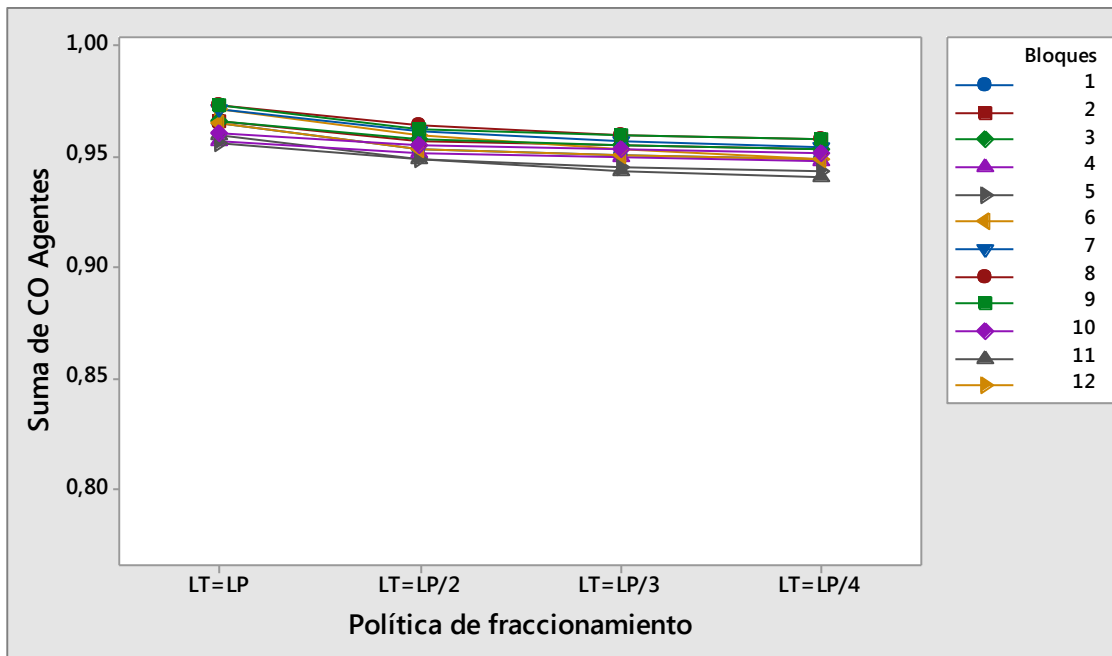


Se observa un aumento en el índice de capacidad ociosa para los niveles de demanda aumentada. Esta variación puede deberse a que el componente fijo relacionado con la distancia recorrida por el agente permanece constante a medida que aumenta la demanda, mientras que el componente de carga y descarga de material crece con el aumento del número de piezas a transportar. En consecuencia, el componente fijo es más representativo para el nivel básico de demanda que para los demás y esto hace que se aumente la fracción de utilización de los recursos destinados para el transporte en este nivel.

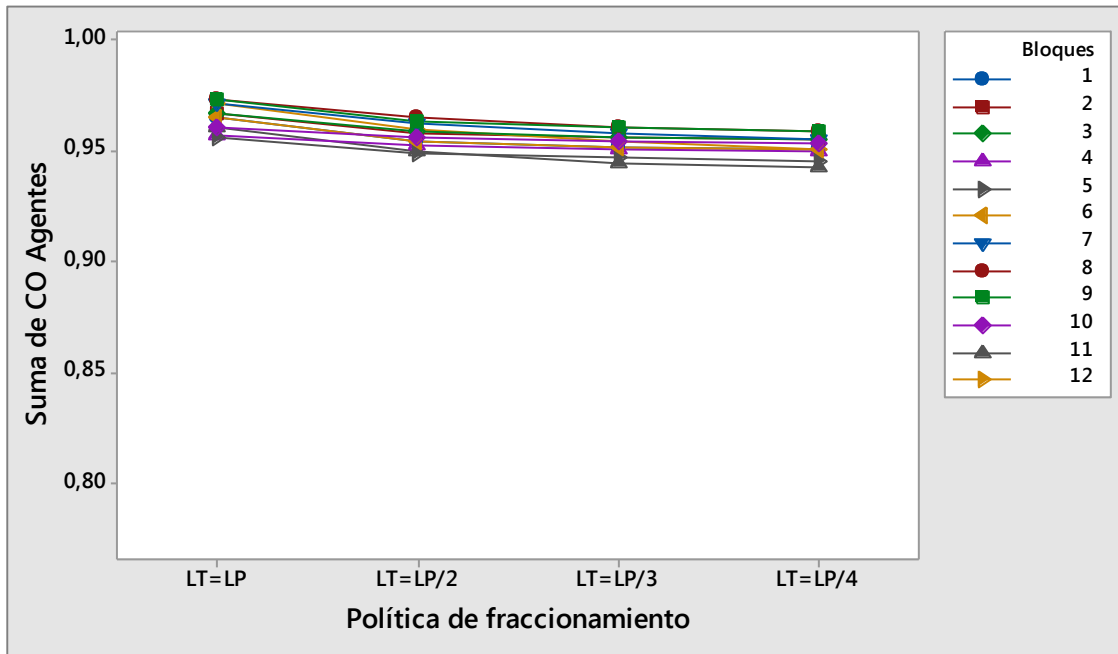
Gráfica 11. Capacidad ociosa de transportadores. Demanda básica.



Gráfica 12. Capacidad ociosa de transportadores. Demanda básica*100.



Gráfica 13. Capacidad ociosa de transportadores. Demanda básica*1000.

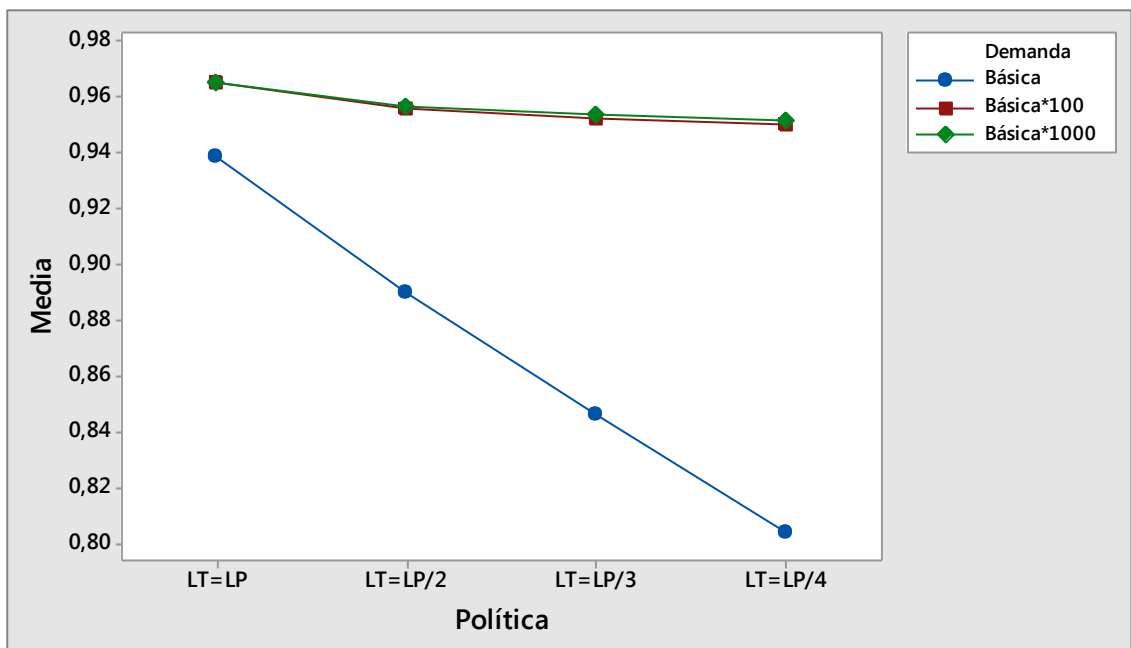


Las gráficas 11, 12 y 13, presentan el comportamiento de la capacidad ociosa en los agentes transportadores para cada una de las mezclas dentro de los diferentes niveles de demanda. Las gráficas permiten observar que la capacidad ociosa de los transportadores es diferente para cada una de las posibilidades de mezcla de los productos, por lo cual se puede decir que en este caso también fue una buena decisión haberla incluido como bloque dentro del diseño.

En cuanto al análisis de interacción, la gráfica 14 muestra que el comportamiento de la capacidad ociosa a través de los niveles del factor política, varía para los diferentes escenarios de carga productiva, especialmente cuando se comparan los niveles de demanda básica con los de demanda aumentada. Cuando la técnica se aplica en un nivel de demanda básica, la capacidad ociosa se reduce progresivamente de una política de fraccionamiento a otra, y la cuarta política proporciona una reducción considerable en la capacidad ociosa de estos recursos. En cambio, cuando se analiza el efecto de la técnica en los niveles de demanda aumentada, se puede observar que la capacidad ociosa de los agentes

transportadores no se reduce en la misma medida que en el caso anterior. El cambio de la primera a la segunda política genera una reducción en la variable, pero, cuando se cambia de la segunda política a la tercera o de la tercera a la cuarta, la reducción no parece ser representativa. Como ya se mencionó en el análisis del efecto principal de la demanda, este comportamiento obedece a que la participación del componente fijo en los tiempos de utilización de los agentes no es igual de representativo para cada nivel de demanda; lo que a su vez puede provocar que exista interacción entre el factor política de fraccionamiento y el factor demanda.

Gráfica 14. Capacidad ociosa de agentes de transportadores. Interacción entre demanda y política de fraccionamiento.



Los estadísticos descriptivos expuestos en la tabla 18, muestran que los indicadores de capacidad ociosa para los agentes transportadores tomaron valores muy altos en comparación con la capacidad ociosa de las máquinas de proceso. A raíz de este hecho, se infiere que el sistema podría operar con un

número menor de agentes transportadores, sin alterar el desempeño obtenido en el makespan y disminuyendo los costos asociados a estos recursos.

Puede observarse además, que el cambio progresivo de política de fraccionamiento aumenta la dispersión de los datos y por tanto es más incierta la estimación de la utilización de los agentes transportadores cuando aumenta el fraccionamiento de lotes.

Tabla 18. Estadísticos descriptivos de la capacidad ociosa de transportadores

Demanda	Política de fraccionamiento	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Rango
Demanda Básica	LT=LP	0,93914	0,00910	0,92524	0,95077	0,02553
	LT=LP/2	0,89008	0,00974	0,87493	0,90413	0,02920
	LT=LP/3	0,84623	0,01115	0,82759	0,86067	0,03308
	LT=LP/4	0,80372	0,01452	0,77697	0,82295	0,04597
Demanda Básica*100	LT=LP	0,96534	0,00603	0,95593	0,97302	0,01709
	LT=LP/2	0,95613	0,00518	0,94834	0,96415	0,01581
	LT=LP/3	0,95255	0,00504	0,94319	0,95956	0,01637
	LT=LP/4	0,95062	0,00518	0,94060	0,95787	0,01728
Demanda Básica*1000	LT=LP	0,96558	0,00600	0,95623	0,97323	0,01700
	LT=LP/2	0,95676	0,00513	0,94904	0,96471	0,01566
	LT=LP/3	0,95357	0,00498	0,94432	0,96050	0,01618
	LT=LP/4	0,95202	0,00509	0,94219	0,95917	0,01698

9.3.2. Análisis de varianza. El análisis de varianza prueba las hipótesis planteadas en el diseño de experimentos, para profundizar en el estudio del comportamiento de la capacidad ociosa de agentes transportadores.

La tabla 19 sugiere que todos los factores tienen efecto significativo sobre esta variable. Sin embargo, una vez más, los resultados no son válidos porque se incumple el supuesto de normalidad de esta variable, como se presenta en el anexo H. Debido a que la transformación de los datos no permitió normalizarlos

(ver anexo H), se debe recurrir al método alternativo de las pruebas no paramétricas.

Tabla 19. ANOVA de la capacidad ociosa de agentes transportadores.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	22	0,371802	0,016900	1067,90	0,000
Bloques	11	0,006240	0,000567	35,85	0,000
Lineal	5	0,300166	0,060033	3793,43	0,000
Demanda	2	0,240999	0,120500	7614,23	0,000
Política	3	0,059167	0,019722	1246,23	0,000
Interacciones de 2 términos					
Demanda*Política	6	0,065396	0,010899	688,72	0,000
Error	121	0,001915	0,000016		
Total	143	0,373717			

La tabla 19 sugiere que todos los factores tienen efecto significativo sobre esta variable. Sin embargo, una vez más, los resultados no son válidos porque se incumple el supuesto de normalidad de esta variable, como se presenta en el anexo H. Debido a que la transformación de los datos no permitió normalizarlos (ver anexo H), se debe recurrir al método alternativo de las pruebas no paramétricas.

9.3.3 Pruebas no paramétricas. Para determinar el efecto de la política de fraccionamiento sobre la capacidad ociosa de los agentes transportadores, se aplica la prueba de Kruskal-Wallis individualmente para cada nivel de demanda y los resultados se presentan en la tabla 20.

Se observa que el valor Z disminuye con la aplicación del *lot streaming*, lo cual obedece a la disminución de la capacidad ociosa de los recursos. Los resultados de esta prueba, muestran que la política de fraccionamiento produce un efecto sobre la capacidad ociosa de los agentes transportadores en los tres escenarios de producción. Lo anterior debido a que en todos los niveles de demanda, el valor p es menor que el nivel de significancia establecido $\alpha=0,05$ y por tanto, se rechaza la hipótesis de igualdad entre los niveles de política de fraccionamiento.

Tabla 20. Prueba de Kruskal-Wallis para capacidad ociosa de transportadores.

Factor Demanda	Factor Política	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z	H	GL	Valor p
Básica	1	12	0,9391	42,5	5,14	44,08	3	0,000
	2	12	0,8913	30,5	1,71			
	3	12	0,8492	18,5	-1,71			
	4	12	0,805	6,5	-5,14			
	General	48		24,5				
Básica*100	1	12	0,9658	40,3	4,5	23,97	3	0,000
	2	12	0,9563	25,3	0,21			
	3	12	0,9531	18,1	-1,83			
	4	12	0,9505	14,4	-2,88			
	General	48		24,5				
Básica*1000	1	12	0,966	40,1	4,45	22,72	3	0,000
	2	12	0,9569	24,6	0,02			
	3	12	0,9541	18,3	-1,76			
	4	12	0,9518	15	-2,71			
	General	48		24,5				

9.3.4 Comparaciones múltiples. Una vez determinado que existe diferencia significativa entre las medianas de los niveles de política de fraccionamiento, se aplica la prueba de Mann-Whitney para conocer cuáles de cada par de grupos presentan diferencia significativa. El nivel de significancia establecido de acuerdo a la corrección de Bonferroni equivale a 0,0083.

La tabla 21 evidencia la existencia de interacción entre los factores política de fraccionamiento y demanda sobre la variable de capacidad ociosa de los agentes transportadores. De esta manera, en el nivel básico de demanda, todos los cambios en la política de fraccionamiento tienen un efecto significativo sobre la utilización de los agentes de transporte, mientras que en los niveles aumentados, sólo existe diferencia significativa entre la primera política y las demás. Este comportamiento puede atribuirse a la influencia del componente fijo del tiempo de transporte que fue explicada en el análisis descriptivo.

Tabla 21. Prueba de Mann Whitney para capacidad ociosa de transportadores.

Nivel de demanda	Política de fraccionamiento		W	Diferencia de medianas	Intervalo de confianza		Valor P
	i	j			Límite inferior	Límite superior	
Demanda Básica	LT=LP	LT=LP/2	222	0,04842	0,03595	0,06028	0,0000 *
		LT=LP/3	222	0,09192	0,07909	0,10787	0,0000 *
		LT=LP/4	222	0,13523	0,11824	0,15258	0,0000 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	222	0,04365	0,02970	0,05727	0,0000 *
		LT=LP/4	222	0,08519	0,06944	0,10340	0,0000 *
	LT=LP/3	LT=LP/4	222	0,04180	0,02649	0,06019	0,0000 *
Demanda Básica*100	LT=LP	LT=LP/2	204	0,00901	0,00224	0,01723	0,0020 *
		LT=LP/3	217	0,01326	0,00547	0,02033	0,0001 *
		LT=LP/4	218	0,01524	0,00728	0,02216	0,0001 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	177	0,00322	-0,00290	0,01043	0,1260
		LT=LP/4	186	0,00530	-0,00063	0,01244	0,0404
	LT=LP/3	LT=LP/4	167	0,00163	-0,00450	0,00865	0,3408
Demanda Básica*1000	LT=LP	LT=LP/2	204	0,00864	0,00193	0,01677	0,0020 *
		LT=LP/3	215	0,01250	0,00470	0,01948	0,0002 *
		LT=LP/4	218	0,01406	0,00624	0,02091	0,0001 *
	LT=LP/2	LT=LP/3	174	0,00281	-0,00319	0,00997	0,1749
		LT=LP/4	181	0,00453	-0,00129	0,01169	0,0783
	LT=LP/3	LT=LP/4	165	0,00125	-0,00486	0,00812	0,4025
*Existe diferencia significativa entre las políticas comparadas al nivel de 0,0083							

La tabla 22 presenta las reducciones de la capacidad ociosa de agentes transportadores. A partir del análisis estadístico se determina que las reducciones de capacidad ociosa de los agentes se consideran significativas cuando superan el 0.91%.

La reducción de la capacidad ociosa de los agentes transportadores, indica que la aplicación de la técnica de *lot streaming* aumenta el tiempo de utilización del sistema de transferencia, haciendo que se vuelva más restrictiva la programación de los movimientos de material dentro del taller.

Esto refleja una de las consecuencias ya mencionadas del *lot streaming* en el manejo y control de materiales, demostrando que la consideración de la actividad de transporte es un aspecto clave en la aplicación de esta técnica y debe ser gestionado cuidadosamente. A partir del análisis, se pudo descubrir que específicamente, bajo un volumen de producción pequeño, el sistema de transferencia es más susceptible a los cambios de política de fraccionamiento debido a la importancia que adquiere el componente fijo del tiempo de viaje en esa escala de producción.

Tabla 22. Porcentaje de reducción de la capacidad ociosa de transportadores.

Nivel de demanda	Política i	Política j	Porcentaje de reducción
Demanda básica	LT=LP	LT=LP/2*	5,224%
		LT=LP/3*	9,894%
		LT=LP/4*	14,420%
	LT=LP/2	LT=LP/3*	4,927%
		LT=LP/4*	9,703%
	LT=LP/3	LT=LP/4*	5,023%
Demanda básica*100	LT=LP	LT=LP/2*	0,954%
		LT=LP/3*	1,324%
		LT=LP/4*	1,525%
	LT=LP/2	LT=LP/3	0,374%
		LT=LP/4	0,577%
	LT=LP/3	LT=LP/4	0,203%
Demanda básica*1000	LT=LP	LT=LP/2*	0,914%
		LT=LP/3*	1,244%
		LT=LP/4*	1,404%
	LT=LP/2	LT=LP/3	0,333%
		LT=LP/4	0,495%
	LT=LP/3	LT=LP/4	0,162%

10. CONCLUSIONES

El análisis de las variables makespan y capacidad ociosa de máquinas de proceso ha permitido demostrar que la técnica de fraccionamiento de lotes efectivamente mejora el desempeño del sistema, en términos de disminución de los tiempos de entrega al cliente y la mejora de la productividad del taller, permitiendo que se pueda responder de manera eficiente a las crecientes exigencias de los consumidores. Estos resultados sirven como motivación para que las empresas adopten la estrategia de *lot streaming* en el sistema de producción con el fin de elevar su competitividad.

Un aspecto que se quiso contemplar en el análisis fue el impacto de la técnica para escenarios de pequeña, mediana y gran escala de producción. El aumento de lotes de transferencia mejora progresivamente las variables analizadas pero, de acuerdo con el análisis estadístico, el efecto de la técnica en la capacidad ociosa los recursos de producción es consistente para todos los niveles de demanda, mientras que el efecto sobre el makespan y la capacidad ociosa de los agentes transportadores difiere entre el nivel de demanda básica y los niveles de demanda aumentada.

La disminución del indicador de capacidad ociosa de las máquinas de proceso refleja que el fraccionamiento de lotes genera mayores niveles de eficiencia en el taller productivo. El análisis de la capacidad ociosa de los agentes de transporte permite corroborar que a medida que aumenta el fraccionamiento de lotes se incrementa la utilización del sistema de transferencia, por lo cual se vuelve un aspecto clave en la programación y se debe gestionar cuidadosamente. Por esta razón, al estudiar la posibilidad de implementar la técnica, es fundamental

establecer si el sistema productivo cuenta con los recursos y las características necesarias para atender los riesgos asociados al incremento de movimientos en el taller. Esta consideración adquiere una mayor importancia en los niveles de demanda básica debido a la incidencia del componente asociado al tiempo de viaje sobre la utilización de los agentes de transporte.

La variable de mayor importancia para este estudio es el makespan, ya que está asociado directamente con la percepción del cliente acerca del servicio proporcionado. En los escenarios de bajos volúmenes de producción, se encontró que cuando el taller trabaja bajo el esquema tradicional, es decir con lotes de transferencia iguales al lote de proceso, el makespan es significativamente mayor que el logrado con el *lot streaming* y no hay diferencia significativa entre las diferentes políticas que aplican fraccionamiento de lotes. En escenarios de volúmenes de producción mayores, los cambios más influyentes en el makespan se obtienen cuando se pasa de hacer transferencias del lote de proceso completo a fraccionar este lote en dos o más sublotes y cuando se pasa de la transferencia de dos sublotes a la de cuatro sublotes.

Considerando los planteamientos anteriores, se establece que si el sistema cuenta con la capacidad de satisfacer eficientemente las exigencias del esfuerzo adicional de manejo de materiales y desea seleccionar la política más conveniente para su operación, optar por la cuarta política proporciona el mayor beneficio debido a que en esta política el makespan es menor y se hace un mejor uso de los recursos.

De lo contrario, si existen dificultades para adaptar el sistema a los requerimientos adicionales mencionados, en escenarios de volúmenes de producción pequeños, la política más apropiada resulta ser la segunda debido a que la tercera y cuarta

incrementan el número de movimientos, sin representar una disminución considerable en la reducción del makespan. En contraste, para escenarios de grandes volúmenes de producción, la cuarta política sí presenta beneficios significativos, por lo que su implementación justificaría el esfuerzo por dar cumplimiento a los nuevos requerimientos.

Por otro lado, el análisis estadístico reveló que la técnica de *lot streaming* reduce la variabilidad de las medidas de desempeño makespan y capacidad ociosa de máquinas entre las diferentes mezclas de producto establecidas. Esto significa que cuando se realiza fraccionamiento de lotes, el desempeño del sistema depende en menor medida de la demanda específica de cada producto que se presente, lo cual resulta ser un aporte valioso para el proceso de planeación de la producción teniendo en cuenta que generalmente se obtiene mayor certeza en la planificación de la demanda agregada.

11. RECOMENDACIONES

El desarrollo de esta investigación sugiere que el problema puede ser abordado teniendo en cuenta otras consideraciones que pueden resultar interesantes para las empresas en el proceso de decisión de implementación de la técnica de fraccionamiento de lotes.

Restringir el número de agentes transportadores disponibles en el sistema puede ser de interés para investigaciones futuras puesto que, como se observó, el fraccionamiento de lotes incrementa el uso de los mismos, y por lo tanto, la actividad de transporte puede ser un impedimento para que la técnica de *lot streaming* reduzca el makespan en sistemas en los cuales se limita aún más la disponibilidad de los transportadores y surge mayor posibilidad de interferencia entre los movimientos. Asimismo, sería apropiado incluir otras consideraciones de la actividad de transporte como capacidad de los agentes, lotes de transferencia variables, tiempos de carga y descarga dependientes del tipo de producto a transportar y tiempos de viaje dependientes de la distribución del taller, es decir, de la distancia entre cada par de máquinas.

Por otro lado, esta investigación considera que todos los parámetros del modelo son determinísticos. No obstante, estudiar ambientes estocásticos permitiría una aproximación más realista al problema, teniendo en cuenta que los sistemas están expuestos a un alto grado de incertidumbre debido a factores como paradas de máquina, diferencia en las habilidades de cada operador para llevar a cabo las tareas, variación en los tiempos de suministro de material, entre otros.

Por último, debido a que el fraccionamiento de lotes exige un esfuerzo adicional en el sistema productivo para responder a las necesidades de control y manejo de materiales y esto impacta en los costos de producción, se propone abordar el problema haciendo un balance entre los beneficios de la aplicación de la técnica y los costos adicionales que requiere su implementación.

BIBLIOGRAFÍA

CENTIKAYA, Ferda. Unit sized transfer batch scheduling in an automated two-machine flow-line cell with one transport agent. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006, vol 29, p. 178–183.

CHASE, Richard B. y JACOBS, Robert F. Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros. 13 ed. México: Mc Graw-Hill, 2011. 780 p.

CHIU, Huan y CHANG, Jen. Cost models for lot streaming in a multistage flow shop. En: Omega. 2005, vol 33, p. 435-450.

CHIU, Huan; CHANG, Jen y LEE, Chia-Hsin. Lot streaming models with a limited number of capacitated transporters in multistage batch production systems. En: Computers and Operations Research. 2004, vol 31, p. 2003-2020.

FANG, Zhi-mei. Mod GUO, Li-li. Modeling study of lot-sizing in virtual enterprise based on Multi- objective. En: IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2011, p 933-937.

GARAVITO, Edwin. Sistemas de transferencia de materiales [online]. Diseño de Plantas. Universidad Industrial de Santander. Disponible en: <<http://gavilan.uis.edu.co/~garavito/docencia/asignatura1/pdfs/Tranferencia%20de%20materiales.pdf>>

GLASSA, Celia y POSSANI, Edgar. Lot streaming multiple jobs in a flow shop. En: International Journal of Production Research. 2010, vol. 49, p. 2669–2681.

GUASH, Antonio; PIERA, Miguel; CASANOVAS, Josep y FIGUERAS, Jaume. Modelado y Simulación. Aplicación a Procesos Logísticos. 2 ed, España: Ediciones UPC, 2003, 312 p.

GUPTA; Shiv y COZZOLINO; John. Fundamentals of operations research for management. An introduction for quantitative methods. Estados Unidos: Holden-Day, Inc, 1975, 405 p.

HOQUE, M. A.; GOYAL, S. K. On lot streaming in multistage production systems. En: International Journal of Production Economics, 2005, vol. 95, no 2, p. 195-202.

HUANG, Rong-Hwa. Multi-objective job-shop scheduling with lot-splitting production. En: International Journal of Production economics. 2010, vol. 124, p. 206-213.

KALIR, Adar y SARIN, Subhash. Optimal solutions for the single batch, flow shop, lot-streaming problem with equal sublots. En: Decision Sciences. 2001, vol 32, p. 387-397.

KIM, Seung-Lae y HA, Deasung. A JIT lot-splitting model for supply chain management: Enhancing buyer–supplier linkage. En: International Journal of Production Economics. 2003. Vol 86, p. 1–10.

LEI, Deming y GUO, Xiuping. Scheduling job shop with lot streaming and transportation through a modified artificial bee colony. En: International Journal of Production Research. 2013. Vol. 51, No. 16, 4930–4941.

Li, W.-Q. Xiao. Lot streaming with supplier-manufacturer coordination. En: Naval Research Logistics, 2004, 51: 522-542.

LOW, Chinyao; HSU, Chih-Ming y HUANG, Kai-I. Benefits of lot splitting in job-shop scheduling. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2004, vol. 24, p. 773-780.

NAHMIAS, Steven. Análisis de la producción y las operaciones. México: Compañía editorial continental, 2004. 817 p.

MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos. Ed 2. México: Editorial Limusa, 2004. 686 p.

MORENO, Wilfrido. Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Colombia: Ediciones UIS. 1993. 330 p.

NÚÑEZ, Ana. Dirección de operaciones: decisiones tácticas y estratégicas. España: Editorial OUC, 621 p.

RAMASESH, Ranga; FU, Haizhen; FONG, Duncan y HAYYA, Jack. Lot streaming in multistage production systems. En: International Journal of Production Economics. 2000. Vol 66, p. 199-211.

SANCAR, Rahime y ORNEK, Arslan. Simulation analysis of lot streaming in job shops with transportation queue disciplines. En: Simulation Modelling Practice and Theory. 2009, vol 17, p. 442–453.

SANCAR, Rahime; ORNEK, Arslan M y TURSEL, Deniz. A review on lot streaming problems with transportation activities. En: Istanbul Commerce University Journal of Science. 2007, vol 6, p 129-142.

SARIN subhash, KALIR Adar y CHEN Ming. A single-lot, unified cost-based job shop lot-streaming problem. En: International Journal of Production Economics. 2008, vol. 113, p 413–424.

SCHROEDER, Roger; MEYER, Susan y RUNGTUSANATHAM, Johnny. Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporáneos. 5 ed. México: Mc Graw-Hill, 2005. 542 p.

VAN NIEUWENHUYSE, Inneke; VANDAELE, Nico. A queueing model for a two-stage stochastic manufacturing system with overlapping operations. En: International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2006, vol. 17, no 3, p. 175-199.

VAN NIEUWENHUYSE, Inneke y VANDAELE, Nico. Analysis of gap times in a two-stage stochastic flow shop with overlapping operations. En: IIE Transactions. 2006, vol 38, p. 777–787.

VAN NIEUWENHUYSE, Inneke y VANDAELE, Nico. Determining the optimal number of sublots in a single-product, deterministic flow shop with overlapping operations. En: International Journal of Production Economics. 2004, vol 92, p. 221–239.

VAN NIEUWENHUYSE, Inneke y VANDAELE, Nico. The impact of delivery lot splitting on delivery reliability in a two-stage supply chain. En: International Journal of Production Economics. 2006. Vol 104, p. 694–708.

WRIGHT, D Rex Y CHANG, Tom. Cycle Time Perspectives for Small Transfer Batch Size. En: Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. 2006. The 17th Annual SEMI/IEEE, p. 312-315.

YANG, Taho y SHEN Yu-An. The dynamic transfer batch-size decision for thin film transistor–liquid crystal display array manufacturing by artificial neural-network. En: Computers & Industrial Engineering. 2011. Vol 60, p. 769-776.

YE, Taofeng. Queueing network analysis on dynamic lot streaming. En: Computers & Operations Research. 2009. Vol 36, p. 415 – 424.

YE, Taofeng. Analysis on multi-stage lot streaming: The effect of transfer. En: Computers & Industrial Engineering. 2012, vol 62, p. 1046–1054.

ZHANG, Haipeng; GEN, Mitsuo. Effective genetic approach for optimizing advanced planning and scheduling in flexible manufacturing system. En: Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation. ACM, 2006. p. 1841-1848.

ZHAO, Yan-wei; WANG, Hai-yan; XU, Xin-li y WANG, Wan-liang. A new hybrid parallel algorithm for consistent-sized batch splitting job shop scheduling on alternative machines with forbidden intervals. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010, vol 48, p. 1091–1105.

ANEXOS

ANEXO A. FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO MATEMÁTICO EN LA ESTRUCTURA PROPIA DEL LENGUAJE DE GAMS

SETS

Es la definición de los índices a utilizar en la formulación del modelo, para este caso son:

I Los trabajos a desarrollar: t1, t2, t3.

J Operaciones en los trabajos: O1, ..., O10.

K Recursos o máquinas: m11, m21, m22, m31, m32, at11, at21, at31, at32.

S Sublotes: 1, 2, 3.

ALIAS

Son índices equivalentes que dan flexibilidad en la formulación de las restricciones, para este modelo son:

I = R

J = D

K = L

PRIMERO(s) Representa el primer sub lote de cada lote perteneciente a un mismo trabajo. El operador ORD permite darle valor numérico a los índices con el fin de determinar la posición relativa del índice en el conjunto de índices. Para este caso, el operador ORD determina cuales sublotes son del orden 1.

FINAL(s) Representa el último sub lote de cada lote perteneciente a un mismo trabajo. El operador CARD permite determinar el número de elementos existentes en un conjunto de índices. Para este caso, el operador ORD determina cuales sublotes son del orden CARD, es decir cuáles son los últimos sublotes de cada trabajo.

SECUENPT1. En este grupo se encuentran las relaciones de secuencia tipo I desde las máquinas de proceso hacia los agentes transportadores, es decir aquellas secuencias de

proceso a transporte donde solo se tiene una unidad tanto del recurso precedente como del siguiente y que por consiguiente no involucran variables binarias.

SECUENPT2. En este grupo se encuentran las relaciones de secuencia tipo II desde las máquinas de proceso hacia los agentes transportadores, es decir aquellas secuencias de proceso a transporte donde se cuenta con dos unidades de la máquina precedente.

SECUENTP1. Contiene las relaciones de secuencia tipo I en las que se va desde los agentes transportadores hacia las máquinas de proceso, es decir aquellas secuencias de transporte a proceso donde solo se tiene una unidad tanto del recurso precedente como del siguiente y que por consiguiente no involucran variables binarias.

SECUENTP2. Contiene relaciones de secuencia de Tipo III. Estas relaciones se presentan de agentes transportadores hacia máquinas de proceso y representan las situaciones en las que se disponen de dos unidades de la máquina que puede realizar la operación siguiente.

CONTINUIDAD. Este grupo contiene las relaciones entre los sublotes consecutivos de un lote de producción, con el fin de garantizar su procesamiento continuo en las máquinas de proceso.

SECUENAT. Agrupa de forma sucesiva los sublotes pertenecientes a un mismo trabajo con el fin de garantizar que los agentes realicen el transporte en el orden correcto.

SECUENS. Contiene las relaciones de secuencia de los sublotes $s > 1$ con el fin de controlar el recorrido de un mismo sublote a lo largo del taller.

ARIA. Este grupo contiene la relación entre las variables binarias Y, para determinar que sólo una de las máquinas de proceso disponibles realice determinada operación.

BIN. Este grupo contiene la relación entre operaciones que pueden realizarse en el tipo de máquina de proceso de la cual se disponen de dos unidades, para establecer cuáles de ellas se realizan en la misma unidad y por lo tanto deben evitar interferencia.

INTERP1. Relaciones de interferencia Tipo I en máquinas de proceso. Contiene las relaciones entre aquellas máquinas de las que sólo se dispone una unidad.

INTERP2. Relaciones de interferencia de Tipo II en máquinas de proceso. Contiene las relaciones entre máquinas que tienen dos unidades en las que es posible ejecutar determinada operación.

INTERT. Relaciones de interferencia Tipo I en agentes transportadores. Contiene las relaciones entre sublotes en los agentes transportadores.

ULTI1. Contiene la operación del final de la ruta de uno de los productos, que se lleva a cabo en una máquina de la cual solo hay disponible una unidad.

ULTI2. Contiene las últimas operaciones del final de la ruta de dos de los productos, que se llevan a cabo en una máquina de la cual hay disponibles dos unidades.

MAQUINAS1. Agrupa las operaciones realizadas por las máquinas de proceso de las cuales se cuenta con una sola unidad, con el fin de calcular su tiempo ocioso.

MAQUINAS2. Agrupa las operaciones realizadas por las máquinas de proceso de las cuales se cuenta con dos unidades, con el fin de calcular su tiempo ocioso. Es necesario confirmar la utilización de las máquinas con la ayuda de la variable binaria Y.

AGENTES. Agrupa las operaciones realizadas por los agentes transportadores, con el fin de calcular su tiempo ocioso.

PARAMETERS

TC(i,j,k) Tiempo de utilización continua de los recursos, en minutos.

TT(i,j,k) Tiempos de inicio en minutos, más temprano posibles, para cada una de las operaciones siguientes.

PS(i,j,k) Tiempo de procesamiento en minutos, de un sólo sublote.

SCALAR

Los escalares utilizados en la formulación de algunas de las restricciones se han definido para este modelo de la siguiente forma:

M Valor constante suficientemente grande, estimado con base en el mayor tiempo de proceso de una máquina. Se seleccionó como valor de M 1000 en la demanda básica. Para la demanda básica por 100 y demanda básica por mil se escogieron los valores 100000 y 1000000.

A Valor constante lo más pequeño que sea posible. Se seleccionó valor negativo de M, es decir -1000 , -100000 y -1000000 .

B Correspondiente a un Epsilon, se escoge de una unidad.

VARIABLES

$X(i,j,k)$ Variable positiva que indica el tiempo de inicio en minutos de cada operación j del trabajo i en el recurso k .

T Medida de eficacia a optimizar en el modelo, correspondiente al makespan. Esta variable debe ser un escalar y de tipo libre.

TO1 Tiempo ocioso de las máquinas de las cuales sólo se dispone de una unidad.

TO2 Tiempo ocioso de las máquinas de las cuales se dispone de dos unidades.

TO Tiempo ocioso total en el taller.

BINARY VARIABLES

Define todas las variables binarias utilizadas en el modelo: $Y(i,j,k)$, $G(i,j,k)$, $Z(i,j,r,d,k)$, $W(i,j,r,d,k)$, $U(i,j,k,r,d,k)$, $V(i,j,r,d,k)$.

EQUATIONS

Define los 43 bloques de ecuaciones que se utilizan en la formulación del modelo y sus respectivas ecuaciones.

Formulación del modelo matemático en el lenguaje de GAMS

```
$ontext
Fraccionamiento de lotes en job shop
$offtext
option limcol=500, limrow=500;
SETS
i    Trabajos /t1*t3/
```

j Operaciones /o1*o10/
k recursos /m11, m21, m22, m31, m32, at1, at2, at3/
s sublotes /1*4/

primero(s) primer sublote
final(s) ultimo sublote;
primero(s) = yes\$(ord(s) eq 1);
final(s) = yes\$(ord(s) eq card(s)) ;
display primero, final;

ALIAS (i,r), (j,d), (k,l);

SET continuidad(i,j,k,r,d,l)

/t1.o1.m11.t1.o1.m11, t2.o6.m11.t2.o6.m11, t3.o7.m11.t3.o7.m11,
t1.o5.m21.t1.o5.m21, t2.o2.m21.t2.o2.m21, t3.o10.m21.t3.o10.m21,
t1.o8.m31.t1.o8.m31, t2.o3.m31.t2.o3.m31, t2.o9.m31.t2.o9.m31,
t3.o4.m31.t3.o4.m31,
t1.o8.m32.t1.o8.m32, t2.o3.m32.t2.o3.m32, t2.o9.m32.t2.o9.m32,
t3.o4.m32.t3.o4.m32/;

SET secuenAT(i,j,k,r,d,l)

/t1.o1.at1.t1.o1.at1, t2.o6.at1.t2.o6.at1, t3.o7.at1.t3.o7.at1,
t1.o5.at2.t1.o5.at2, t2.o2.at2.t2.o2.at2,
t2.o3.at3.t2.o3.at3, t3.o4.at3.t3.o4.at3/;

SET secuenS(i,j,k,r,d,l)

/t1.o1.m11.t1.o1.at1, t1.o5.m21.t1.o5.at2, t2.o2.m21.t2.o2.at2, t2.o6.m11.t2.o6.at1,
t3.o7.m11.t3.o7.at1,
t2.o3.m31.t2.o3.at3, t2.o3.m32.t2.o3.at3, t3.o4.m31.t3.o4.at3, t3.o4.m32.t3.o4.at3,
t1.o1.at1.t1.o5.m21, t2.o2.at2.t2.o6.m11, t3.o7.at1.t3.o10.m21,
t2.o3.at3.t2.o6.m11, t3.o4.at3.t3.o7.m11,
t1.o5.at2.t1.o8.m31, t1.o5.at2.t1.o8.m32, t2.o6.at1.t2.o9.m31, t2.o6.at1.t2.o9.m32/;

SET secuenPT1(i,j,k,r,d,l)

/t1.o1.m11.t1.o1.at1, t1.o5.m21.t1.o5.at2, t2.o2.m21.t2.o2.at2, t2.o6.m11.t2.o6.at1,
t3.o7.m11.t3.o7.at1/;

SET secuenPT2(i,j,k,r,d,l)

/t2.o3.m31.t2.o3.at3, t2.o3.m32.t2.o3.at3, t3.o4.m31.t3.o4.at3,
t3.o4.m32.t3.o4.at3/;

SET secuenTP1(i,j,k,r,d,l)
/t1.o1.at1.t1.o5.m21, t2.o2.at2.t2.o6.m11, t3.o7.at1.t3.o10.m21,
t2.o3.at3.t2.o6.m11, t3.o4.at3.t3.o7.m11/;

SET secuenTP2(i,j,k,r,d,l)
/t1.o5.at2.t1.o8.m31, t1.o5.at2.t1.o8.m32, t2.o6.at1.t2.o9.m31,
t2.o6.at1.t2.o9.m32/;

SET aria(i,j,k,l)
/t2.o3.m31.m32, t3.o4.m31.m32, t1.o8.m31.m32, t2.o9.m31.m32/;

SET bin(i,j,k,r,d)
/t1.o8.m31.t2.o3, t1.o8.m32.t2.o3, t1.o8.m31.t2.o9, t1.o8.m32.t2.o9,
t1.o8.m31.t3.o4, t1.o8.m32.t3.o4, t2.o3.m31.t2.o9, t2.o3.m32.t2.o9,
t2.o3.m31.t3.o4, t2.o3.m32.t3.o4, t2.o9.m31.t3.o4, t2.o9.m32.t3.o4 /;

SET interP1(i,j,k,r,d,l)
/t1.o1.m11.(t2.o6.m11, t3.o7.m11), t2.o6.m11.t3.o7.m11,
t1.o5.m21.(t2.o2.m21, t3.o10.m21), t2.o2.m21.t3.o10.m21/;

SET interP2(i,j,k,r,d,l)
/t1.o8.m31.(t2.o3.m31, t2.o9.m31, t3.o4.m31), t2.o3.m31.(t2.o9.m31, t3.o4.m31),
t2.o9.m31.t3.o4.m31, t1.o8.m32.(t2.o3.m32, t2.o9.m32, t3.o4.m32),
t2.o3.m32.(t2.o9.m32, t3.o4.m32), t2.o9.m32.t3.o4.m32/;

SET interT(i,j,k,r,d,l)
/t1.o1.at1.(t2.o6.at1, t3.o7.at1), t2.o6.at1.t3.o7.at1,
t1.o5.at2.t2.o2.at2, t2.o3.at3.t3.o4.at3/;

SET ulti1(i,j,k)
/t3.o10.m21/;

SET ulti2(i,j,k)
/t1.o8.m31, t1.o8.m32, t2.o9.m31, t2.o9.m32/;

SET maquinas1(i,j,k)
/t1.o1.m11, t1.o5.m21, t2.o2.m21, t2.o6.m11, t3.o7.m11, t3.o10.m21/;

SET maquinas2(i,j,k)
 /t2.o3.m31, t2.o3.m32, t3.o4.m31, t3.o4.m32, t1.o8.m31, t1.o8.m32, t2.o9.m31,
 t2.o9.m32/;

SET Agentes(i,j,k)
 /t1.o1.at1, t1.o5.at2, t2.o2.at2, t2.o6.at1, t3.o7.at1, t3.o10.at2,
 t2.o3.at3, t3.o4.at3, t1.o8.at3, t2.o9.at3/;

PARAMETER TC(i,j,k) tiempo de utilización continua de los recursos

/
 t1.o1.m11 310 ,
 t1.o1.at1 13.75 ,
 t1.o5.m21 210 ,
 t1.o5.at2 13.75 ,
 t1.o8.m31 320 , t1.o8.m32 320 ,
 t2.o2.m21 174 ,
 t2.o2.at2 13 ,
 t2.o3.m31 116 , t2.o3.m32 116 ,
 t2.o3.at3 13 ,
 t2.o6.m11 106 ,
 t2.o6.at1 13 ,
 t2.o9.m31 260 , t2.o9.m32 260 ,
 t3.o4.m31 236 , t3.o4.m32 236 ,
 t3.o4.at3 12.25 ,
 t3.o7.m11 154 ,
 t3.o7.at1 12.25 ,
 t3.o10.m21 138 /;

PARAMETER PS (i,j,k) tiempo de proceso de un sublote

/
 t1.o1.m11 75 ,
 t1.o1.at1 8.75 ,
 t1.o5.m21 45 ,
 t1.o5.at2 8.75 ,
 t1.o8.m31 75 , t1.o8.m32 75 ,
 t2.o2.m21 36 ,
 t2.o2.at2 8 ,
 t2.o3.m31 24 , t2.o3.m32 24 ,
 t2.o3.at3 8 ,

t2.o6.m11	24	,		
t2.o6.at1	8	,		
t2.o9.m31	60	,	t2.o9.m32	60
t3.o4.m31	54	,	t3.o4.m32	54
t3.o4.at3	7.25	,		
t3.o7.m11	36	,		
t3.o7.at1	7.25	,		
t3.o10.m21	27/;			

PARAMETER TT(i,j,k) tiempo más temprano

/

t1.o1.m11	85	,		
t1.o1.at1	-21.25	,		
t1.o5.m21	75	,		
t1.o5.at2	-11.25	,		
t1.o8.m31	95	,	t1.o8.m32	95
t2.o2.m21	66	,		
t2.o2.at2	-12	,		
t2.o3.m31	44	,	t2.o3.m32	44
t2.o3.at3	-2	,		
t2.o6.m11	34	,		
t2.o6.at1	-12	,		
t2.o9.m31	80	,	t2.o9.m32	80
t3.o4.m31	74	,	t3.o4.m32	74
t3.o4.at3	-2.75	,		
t3.o7.m11	46	,		
t3.o7.at1	-22.75	,		
t3.o10.m21	57/;			

SCALAR m valor maximo /1000/;

SCALAR a valor minimo /-1000/;

SCALAR b valor epsilon /1/;

SCALAR n numero de sublotes /4/;

POSITIVE VARIABLES x(i,j,k,s) Tiempo de inicio operacion del sublote;

VARIABLES t Makespan

tom tiempo ocioso de máquinas

tom1 tiempo ocioso máquinas con una unidad

tom2 tiempo ocioso máquinas con dos unidades

tot tiempo ocioso de agentes transportadores;

BINARY VARIABLES $y(i,j,k)$, $g(i,j,k)$, $z(i,j,r,d,k)$, $W(i,j,r,d,k)$,

$u(i,j,r,d,k)$, $v(i,j,r,d,k)$;

EQUATIONS

R1(i,j,k,r,d,l,s) Restricción de secuencia

R2(i,j,k,r,d,l,s) Restricción de secuencia

R3(i,j,k,r,d,l,s) Restricción de secuencia

R4(i,j,k,r,d,l,s) Restricción de secuencia

R5(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de secuencia

R6(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de secuencia

R7(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de secuencia

R8(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de secuencia

R9(i,j,k,l) Restriccion de binarias

R10(i,j,k,r,d) Restriccion de binarias

R11(i,j,k,r,d) Restriccion de binarias

R12(i,j,k,r,d) Restriccion de binarias

R13(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R14(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R15(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R16(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R17(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R18(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R19(i,j,k,r,d,l) Restriccion de binarias

R20(i,j,k,r,d,l) Restriccion de binarias

R21(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R22(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R23(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R24(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R25(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R26(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R27(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R28(i,j,k,r,d,l,s) Restriccion de interferencia

R29(i,j,k,s) Restriccion ultima

R30(i,j,k,s) Restriccion ultima

R31 Tiempo ocioso

R32 Tiempo ocioso

R33 Tiempo ocioso

R34 Tiempo ocioso;

R1(i,j,k,r,d,l,s) $\$(continuidad(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s)))..$
 $sum(continuidad(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k,s) + TT(i,j,k)) =e= sum(continuidad(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,d,l,s+1));$

R2(i,j,k,r,d,l,s) $\$(continuidad(i,j,k,r,d,l)\$(not primero(s) and not final(s)))..$
 $sum(continuidad(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k,s) + PS(i,j,k)) =e= sum(continuidad(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,d,l,s+1));$

R3(i,j,k,r,d,l,s) $\$(secuenAT(i,j,k,r,d,l)\$(not final(s)))..$ $sum(secuenAT(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,j,k,s) + TC(i,j,k)) =l= sum(secuenAT(i,j,k,r,d,l), x(i,d,l,s+1));$

R4(i,j,k,r,d,l,s) $\$(secuenS(i,j,k,r,d,l)\$(not primero(s)))..$ $sum(secuenS(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,j,k,s) + PS(i,j,k)) =l= sum(secuenS(i,j,k,r,d,l), x(i,d,l,s));$

R5(i,j,k,r,d,l,s) $\$(secuenPT1(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s)))..$ $sum(secuenPT1(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,j,k,s) + TT(i,j,k)) =l= sum(secuenPT1(i,j,k,r,d,l), x(i,d,l,s));$

R6(i,j,k,r,d,l,s) $\$(secuenPT2(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s)))..$ $sum(secuenPT2(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,j,k,s) + TT(i,j,k)) =l= sum(secuenPT2(i,j,k,r,d,l), x(i,d,l,s)+ m*(1 -y(i,j,k)));$

R7(i,j,k,r,d,l,s) $\$(secuenTP1(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s)))..$ $sum(secuenTP1(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,j,k,s) + TT(i,j,k)) =l= sum(secuenTP1(i,j,k,r,d,l), x(i,d,l,s));$

R8(i,j,k,r,d,l,s) $\$(secuenTP2(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s)))..$ $sum(secuenTP2(i,j,k,r,d,l),$
 $x(i,j,k,s) + TT(i,j,k)) =l= sum(secuenTP2(i,j,k,r,d,l), x(i,d,l,s)+ m*(1 -y(i,d,l)));$

R9(i,j,k,l) $\$aria(i,j,k,l)..$ $sum(aria(i,j,k,l), y(i,j,k) + y(i,j,l))=e= 1;$

R10(i,j,k,r,d) $\$bin(i,j,k,r,d)..$ $sum(bin(i,j,k,r,d), -y(i,j,k) + w(i,j,r,d,k)) =l= 0;$

$$R11(i,j,k,r,d)\$bin(i,j,k,r,d).. \quad \text{sum}(bin(i,j,k,r,d), -y(r,d,k) + w(i,j,r,d,k)) = 0;$$

$$R12(i,j,k,r,d)\$bin(i,j,k,r,d).. \quad \text{sum}(bin(i,j,k,r,d), y(i,j,k) + y(r,d,k) - w(i,j,r,d,k)) = 1;$$

$$R13(i,j,k,r,d,l,s)\$(interP1(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s))).. \quad \text{sum}(interP1(i,j,k,r,d,l), \\ m*z(i,j,r,d,k) + x(i,j,k,s) - x(r,d,l,s)) = g = TC(r,d,l) ;$$

$$R14(i,j,k,r,d,l,s)\$(interP1(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s))).. \quad \text{sum}(interP1(i,j,k,r,d,l), \\ m*(1-z(i,j,r,d,k))+ x(r,d,l,s) - x(i,j,k,s)) = g = TC(i,j,k);$$

$$R15(i,j,k,r,d,l,s)\$(interP2(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s))).. \quad \text{sum}(interP2(i,j,k,r,d,l), \\ x(i,j,k,s) - x(r,d,l,s) + a*u(i,j,r,d,k)) = g = TC(r,d,l) + a;$$

$$R16(i,j,k,r,d,l,s)\$(interP2(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s))).. \quad \text{sum}(interP2(i,j,k,r,d,l), \\ x(i,j,k,s) - x(r,d,l,s) - (m+b)*u(i,j,r,d,k)) = TC(r,d,l) - b;$$

$$R17(i,j,k,r,d,l,s)\$(interP2(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s))).. \quad \text{sum}(interP2(i,j,k,r,d,l), \\ x(r,d,l,s) - x(i,j,k,s) + a*v(i,j,r,d,k)) = g = TC(i,j,k) + a;$$

$$R18(i,j,k,r,d,l,s)\$(interP2(i,j,k,r,d,l)\$(primero(s))).. \quad \text{sum}(interP2(i,j,k,r,d,l), \\ x(r,d,l,s) - x(i,j,k,s) - (m+b)*v(i,j,r,d,k)) = TC(i,j,k) - b;$$

$$R19(i,j,k,r,d,l)\$interP2(i,j,k,r,d,l).. \quad \text{sum}(interP2(i,j,k,r,d,l), w(i,j,r,d,k) + u(i,j,r,d,k) + \\ v(i,j,r,d,k)) = 2;$$

$$R20(i,j,k,r,d,l)\$interP2(i,j,k,r,d,l).. \quad \text{sum}(interP2(i,j,k,r,d,l), w(i,j,r,d,k) - u(i,j,r,d,k) - \\ v(i,j,r,d,k)) = 0;$$

$$R21(i,j,k,r,d,l,s)\$(interT(i,j,k,r,d,l)).. \quad \text{sum}(interT(i,j,k,r,d,l), m*z(i,j,r,d,k) + \\ x(i,j,k,s) - x(r,d,l,s)) = g = TC(r,d,l) ;$$

$$R22(i,j,k,r,d,l,s)\$(interT(i,j,k,r,d,l)).. \quad \text{sum}(interT(i,j,k,r,d,l), m*(1-z(i,j,r,d,k))+ \\ x(r,d,l,s) - x(i,j,k,s)) = g = TC(i,j,k);$$

$$R23(i,j,k,r,d,l,s)\$(interT(i,j,k,r,d,l)).. \quad \text{sum}(interT(i,j,k,r,d,l), m*z(i,j,r,d,k) + \\ x(i,j,k,s) - x(r,d,l,s+1)) = g = TC(r,d,l) ;$$

$$R24(i,j,k,r,d,l,s)\$(interT(i,j,k,r,d,l)).. \quad \text{sum}(interT(i,j,k,r,d,l), m*(1-z(i,j,r,d,k))+ \\ x(r,d,l,s+1) - x(i,j,k,s)) = g = TC(i,j,k);$$

$$R25(i,j,k,r,d,l,s) \$(interT(i,j,k,r,d,l)) \dots \sum(interT(i,j,k,r,d,l), m*z(i,j,r,d,k) + x(i,j,k,s) - x(r,d,l,s++2)) =g= TC(r,d,l) ;$$

$$R26(i,j,k,r,d,l,s) \$(interT(i,j,k,r,d,l)) \dots \sum(interT(i,j,k,r,d,l), m*(1-z(i,j,r,d,k))+ x(r,d,l,s++2) - x(i,j,k,s)) =g= TC(i,j,k);$$

$$R27(i,j,k,r,d,l,s) \$(interT(i,j,k,r,d,l)) \dots \sum(interT(i,j,k,r,d,l), m*z(i,j,r,d,k) + x(i,j,k,s) - x(r,d,l,s++3)) =g= TC(r,d,l) ;$$

$$R28(i,j,k,r,d,l,s) \$(interT(i,j,k,r,d,l)) \dots \sum(interT(i,j,k,r,d,l), m*(1-z(i,j,r,d,k))+ x(r,d,l,s++3) - x(i,j,k,s)) =g= TC(i,j,k);$$

$$R29(i,j,k,s) \$(ulti1(i,j,k) \$(primero(s))) \dots \sum(ulti1(i,j,k), x(i,j,k,s) + TC(i,j,k)) =l= t;$$

$$R30(i,j,k,s) \$(ulti2(i,j,k) \$(primero(s))) \dots \sum(ulti2(i,j,k), x(i,j,k,s) + TC(i,j,k)) =l= t + m*(1-y(i,j,k));$$

$$R31.. 2*t- \sum(maquinas2(i,j,k), TC(i,j,k)*y(i,j,k))=e= tom2;$$

$$R32.. 2*t- \sum(maquinas1(i,j,k), TC(i,j,k)) =e= tom1;$$

$$R33.. tom1+tom2 =e= tom;$$

$$R34.. 3*t- \sum(agentes(i,j,k), (n*TC(i,j,k)))=e= tot;$$

```

model tipo1 "Cuarta política de fraccionamiento" /ALL/;
tipo1.OPTFILE =1;
tipo1.optcr=0.000001;
tipo1.iterlim = 10000;
SOLVE tipo1 USING MIP MINIMIZING t;

```

ANEXO B. PARÁMETROS TC DE LAS INSTANCIAS

Casos política 1. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	310	310	250	250	190	190	370	370	250	250	130	130
t1.o1.at1	25	25	22	22	19	19	28	28	22	22	16	16
t1.o5.m21	210	210	174	174	138	138	246	246	174	174	102	102
t1.o5.at2	25	25	22	22	19	19	28	28	22	22	16	16
t1.o8.m31/m32	320	320	260	260	200	200	380	380	260	260	140	140
t2.o2.m21	174	138	138	210	210	174	174	102	102	246	246	174
t2.o2.at2	22	19	19	25	25	22	22	16	16	28	28	22
t2.o3.m31/m32	116	92	92	140	140	116	116	68	68	164	164	116
t2.o3.at3	22	19	19	25	25	22	22	16	16	28	28	22
t2.o6.m11	106	82	82	130	130	106	106	58	58	154	154	106
t2.o6.at1	22	19	19	25	25	22	22	16	16	28	28	22
t2.o9.m31/m32	260	200	200	320	320	260	260	140	140	380	380	260
t3.o4.m31/m32	236	308	380	236	308	380	164	308	452	164	308	452
t3.o4.at3	19	22	25	19	22	25	16	22	28	16	22	28
t3.o7.m11	154	202	250	154	202	250	106	202	298	106	202	298
t3.o7.at1	19	22	25	19	22	25	16	22	28	16	22	28
t3.o10.m21	138	174	210	138	174	210	102	174	246	102	174	246

Casos política 2. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	310	310	250	250	190	190	370	370	250	250	130	130
t1.o1.at1	17,5	17,5	16	16	14,5	14,5	19	19	16	16	13	13
t1.o5.m21	210	210	174	174	138	138	246	246	174	174	102	102
t1.o5.at2	17,5	17,5	16	16	14,5	14,5	19	19	16	16	13	13
t1.o8.m31/m32	320	320	260	260	200	200	380	380	260	260	140	140
t2.o2.m21	174	138	138	210	210	174	174	102	102	246	246	174
t2.o2.at2	16	14,5	14,5	17,5	17,5	16	16	13	13	19	19	16
t2.o3.m31/m32	116	92	92	140	140	116	116	68	68	164	164	116
t2.o3.at3	16	14,5	14,5	17,5	17,5	16	16	13	13	19	19	16
t2.o6.m11	106	82	82	130	130	106	106	58	58	154	154	106
t2.o6.at1	16	14,5	14,5	17,5	17,5	16	16	13	13	19	19	16
t2.o9.m31/m32	260	200	200	320	320	260	260	140	140	380	380	260
t3.o4.m31/m32	236	308	380	236	308	380	164	308	452	164	308	452
t3.o4.at3	14,5	16	17,5	14,5	16	17,5	13	16	19	13	16	19
t3.o7.m11	154	202	250	154	202	250	106	202	298	106	202	298
t3.o7.at1	14,5	16	17,5	14,5	16	17,5	13	16	19	13	16	19
t3.o10.m21	138	174	210	138	174	210	102	174	246	102	174	246

Casos política 3. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	310	310	250	250	190	190	370	370	250	250	130	130
t1.o1.at1	15	15	14	14	13	13	16	16	14	14	12	12
t1.o5.m21	210	210	174	174	138	138	246	246	174	174	102	102
t1.o5.at2	15	15	14	14	13	13	16	16	14	14	12	12
t1.o8.m31/m32	320	320	260	260	200	200	380	380	260	260	140	140
t2.o2.m21	174	138	138	210	210	174	174	102	102	246	246	174
t2.o2.at2	14	13	13	15	15	14	14	12	12	16	16	14
t2.o3.m31/m32	116	92	92	140	140	116	116	68	68	164	164	116
t2.o3.at3	14	13	13	15	15	14	14	12	12	16	16	14
t2.o6.m11	106	82	82	130	130	106	106	58	58	154	154	106
t2.o6.at1	14	13	13	15	15	14	14	12	12	16	16	14
t2.o9.m31/m32	260	200	200	320	320	260	260	140	140	380	380	260
t3.o4.m31/m32	236	308	380	236	308	380	164	308	452	164	308	452
t3.o4.at3	13	14	15	13	14	15	12	14	16	12	14	16
t3.o7.m11	154	202	250	154	202	250	106	202	298	106	202	298
t3.o7.at1	13	14	15	13	14	15	12	14	16	12	14	16
t3.o10.m21	138	174	210	138	174	210	102	174	246	102	174	246

Casos política 4. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	310	310	250	250	190	190	370	370	250	250	130	130
t1.o1.at1	13,75	13,75	13	13	12,25	12,25	14,5	14,5	13	13	11,5	11,5
t1.o5.m21	210	210	174	174	138	138	246	246	174	174	102	102
t1.o5.at2	13,75	13,75	13	13	12,25	12,25	14,5	14,5	13	13	11,5	11,5
t1.o8.m31/m32	320	320	260	260	200	200	380	380	260	260	140	140
t2.o2.m21	174	138	138	210	210	174	174	102	102	246	246	174
t2.o2.at2	13	12,25	12,25	13,75	13,75	13	13	11,5	11,5	14,5	14,5	13
t2.o3.m31/m32	116	92	92	140	140	116	116	68	68	164	164	116
t2.o3.at3	13	12,25	12,25	13,75	13,75	13	13	11,5	11,5	14,5	14,5	13
t2.o6.m11	106	82	82	130	130	106	106	58	58	154	154	106
t2.o6.at1	13	12,25	12,25	13,75	13,75	13	13	11,5	11,5	14,5	14,5	13
t2.o9.m31/m32	260	200	200	320	320	260	260	140	140	380	380	260
t3.o4.m31/m32	236	308	380	236	308	380	164	308	452	164	308	452
t3.o4.at3	12,25	13	13,75	12,25	13	13,75	11,5	13	14,5	11,5	13	14,5
t3.o7.m11	154	202	250	154	202	250	106	202	298	106	202	298
t3.o7.at1	12,25	13	13,75	12,25	13	13,75	11,5	13	14,5	11,5	13	14,5
t3.o10.m21	138	174	210	138	174	210	102	174	246	102	174	246

Casos política 1. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	30010	30010	24010	24010	18010	18010	36010	36010	24010	24010	12010	12010
t1.o1.at1	1510	1510	1210	1210	910	910	1810	1810	1210	1210	610	610
t1.o5.m21	18030	18030	14430	14430	10830	10830	21630	21630	14430	14430	7230	7230
t1.o5.at2	1510	1510	1210	1210	910	910	1810	1810	1210	1210	610	610
t1.o8.m31/m32	30020	30020	24020	24020	18020	18020	36020	36020	24020	24020	12020	12020
t2.o2.m21	14430	10830	10830	18030	18030	14430	14430	7230	7230	21630	21630	14430
t2.o2.at2	1210	910	910	1510	1510	1210	1210	610	610	1810	1810	1210
t2.o3.m31/m32	9620	7220	7220	12020	12020	9620	9620	4820	4820	14420	14420	9620
t2.o3.at3	1210	910	910	1510	1510	1210	1210	610	610	1810	1810	1210
t2.o6.m11	9610	7210	7210	12010	12010	9610	9610	4810	4810	14410	14410	9610
t2.o6.at1	1210	910	910	1510	1510	1210	1210	610	610	1810	1810	1210
t2.o9.m31/m32	24020	18020	18020	30020	30020	24020	24020	12020	12020	36020	36020	24020
t3.o4.m31/m32	21620	28820	36020	21620	28820	36020	14420	28820	43220	14420	28820	43220
t3.o4.at3	910	1210	1510	910	1210	1510	610	1210	1810	610	1210	1810
t3.o7.m11	14410	19210	24010	14410	19210	24010	9610	19210	28810	9610	19210	28810
t3.o7.at1	910	1210	1510	910	1210	1510	610	1210	1810	610	1210	1810
t3.o10.m21	10830	14430	18030	10830	14430	18030	7230	14430	21630	7230	14430	21630

Casos política 2. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	30010	30010	24010	24010	18010	18010	36010	36010	24010	24010	12010	12010
t1.o1.at1	760	760	610	610	460	460	910	910	610	610	310	310
t1.o5.m21	18030	18030	14430	14430	10830	10830	21630	21630	14430	14430	7230	7230
t1.o5.at2	760	760	610	610	460	460	910	910	610	610	310	310
t1.o8.m31/m32	30020	30020	24020	24020	18020	18020	36020	36020	24020	24020	12020	12020
t2.o2.m21	14430	10830	10830	18030	18030	14430	14430	7230	7230	21630	21630	14430
t2.o2.at2	610	460	460	760	760	610	610	310	310	910	910	610
t2.o3.m31/m32	9620	7220	7220	12020	12020	9620	9620	4820	4820	14420	14420	9620
t2.o3.at3	610	460	460	760	760	610	610	310	310	910	910	610
t2.o6.m11	9610	7210	7210	12010	12010	9610	9610	4810	4810	14410	14410	9610
t2.o6.at1	610	460	460	760	760	610	610	310	310	910	910	610
t2.o9.m31/m32	24020	18020	18020	30020	30020	24020	24020	12020	12020	36020	36020	24020
t3.o4.m31/m32	21620	28820	36020	21620	28820	36020	14420	28820	43220	14420	28820	43220
t3.o4.at3	460	610	760	460	610	760	310	610	910	310	610	910
t3.o7.m11	14410	19210	24010	14410	19210	24010	9610	19210	28810	9610	19210	28810
t3.o7.at1	460	610	760	460	610	760	310	610	910	310	610	910
t3.o10.m21	10830	14430	18030	10830	14430	18030	7230	14430	21630	7230	14430	21630

Casos política 3. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	30010	30010	24010	24010	18010	18010	36010	36010	24010	24010	12010	12010
t1.o1.at1	510	510	410	410	310	310	610	610	410	410	210	210
t1.o5.m21	18030	18030	14430	14430	10830	10830	21630	21630	14430	14430	7230	7230
t1.o5.at2	510	510	410	410	310	310	610	610	410	410	210	210
t1.o8.m31/m32	30020	30020	24020	24020	18020	18020	36020	36020	24020	24020	12020	12020
t2.o2.m21	14430	10830	10830	18030	18030	14430	14430	7230	7230	21630	21630	14430
t2.o2.at2	410	310	310	510	510	410	410	210	210	610	610	410
t2.o3.m31/m32	9620	7220	7220	12020	12020	9620	9620	4820	4820	14420	14420	9620
t2.o3.at3	410	310	310	510	510	410	410	210	210	610	610	410
t2.o6.m11	9610	7210	7210	12010	12010	9610	9610	4810	4810	14410	14410	9610
t2.o6.at1	410	310	310	510	510	410	410	210	210	610	610	410
t2.o9.m31/m32	24020	18020	18020	30020	30020	24020	24020	12020	12020	36020	36020	24020
t3.o4.m31/m32	21620	28820	36020	21620	28820	36020	14420	28820	43220	14420	28820	43220
t3.o4.at3	310	410	510	310	410	510	210	410	610	210	410	610
t3.o7.m11	14410	19210	24010	14410	19210	24010	9610	19210	28810	9610	19210	28810
t3.o7.at1	310	410	510	310	410	510	210	410	610	210	410	610
t3.o10.m21	10830	14430	18030	10830	14430	18030	7230	14430	21630	7230	14430	21630

Casos política 4. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	30010	30010	24010	24010	18010	18010	36010	36010	24010	24010	12010	12010
t1.o1.at1	385	385	310	310	235	235	460	460	310	310	160	160
t1.o5.m21	18030	18030	14430	14430	10830	10830	21630	21630	14430	14430	7230	7230
t1.o5.at2	385	385	310	310	235	235	460	460	310	310	160	160
t1.o8.m31/m32	30020	30020	24020	24020	18020	18020	36020	36020	24020	24020	12020	12020
t2.o2.m21	14430	10830	10830	18030	18030	14430	14430	7230	7230	21630	21630	14430
t2.o2.at2	310	235	235	385	385	310	310	160	160	460	460	310
t2.o3.m31/m32	9620	7220	7220	12020	12020	9620	9620	4820	4820	14420	14420	9620
t2.o3.at3	310	235	235	385	385	310	310	160	160	460	460	310
t2.o6.m11	9610	7210	7210	12010	12010	9610	9610	4810	4810	14410	14410	9610
t2.o6.at1	310	235	235	385	385	310	310	160	160	460	460	310
t2.o9.m31/m32	24020	18020	18020	30020	30020	24020	24020	12020	12020	36020	36020	24020
t3.o4.m31/m32	21620	28820	36020	21620	28820	36020	14420	28820	43220	14420	28820	43220
t3.o4.at3	235	310	385	235	310	385	160	310	460	160	310	460
t3.o7.m11	14410	19210	24010	14410	19210	24010	9610	19210	28810	9610	19210	28810
t3.o7.at1	235	310	385	235	310	385	160	310	460	160	310	460
t3.o10.m21	10830	14430	18030	10830	14430	18030	7230	14430	21630	7230	14430	21630

Casos política 1. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	300010	300010	240010	240010	180010	180010
t1.o1.at1	15010	15010	12010	12010	9010	9010
t1.o5.m21	180030	180030	144030	144030	108030	108030
t1.o5.at2	15010	15010	12010	12010	9010	9010
t1.o8.m31/m32	300020	300020	240020	240020	180020	180020
t2.o2.m21	144030	108030	108030	180030	180030	144030
t2.o2.at2	12010	9010	9010	15010	15010	12010
t2.o3.m31/m32	96020	72020	72020	120020	120020	96020
t2.o3.at3	12010	9010	9010	15010	15010	12010
t2.o6.m11	96010	72010	72010	120010	120010	96010
t2.o6.at1	12010	9010	9010	15010	15010	12010
t2.o9.m31/m32	240020	180020	180020	300020	300020	240020
t3.o4.m31/m32	216020	288020	360020	216020	288020	360020
t3.o4.at3	9010	12010	15010	9010	12010	15010
t3.o7.m11	144010	192010	240010	144010	192010	240010
t3.o7.at1	9010	12010	15010	9010	12010	15010
t3.o10.m21	108030	144030	180030	108030	144030	180030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	360010	360010	240010	240010	120010	120010
t1.o1.at1	18010	18010	12010	12010	6010	6010
t1.o5.m21	216030	216030	144030	144030	72030	72030
t1.o5.at2	18010	18010	12010	12010	6010	6010
t1.o8.m31/m32	360020	360020	240020	240020	120020	120020
t2.o2.m21	144030	72030	72030	216030	216030	144030
t2.o2.at2	12010	6010	6010	18010	18010	12010
t2.o3.m31/m32	96020	48020	48020	144020	144020	96020
t2.o3.at3	12010	6010	6010	18010	18010	12010
t2.o6.m11	96010	48010	48010	144010	144010	96010
t2.o6.at1	12010	6010	6010	18010	18010	12010
t2.o9.m31/m32	240020	120020	120020	360020	360020	240020
t3.o4.m31/m32	144020	288020	432020	144020	288020	432020
t3.o4.at3	6010	12010	18010	6010	12010	18010
t3.o7.m11	96010	192010	288010	96010	192010	288010
t3.o7.at1	6010	12010	18010	6010	12010	18010
t3.o10.m21	72030	144030	216030	72030	144030	216030

Casos política 2. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	300010	300010	240010	240010	180010	180010
t1.o1.at1	7510	7510	6010	6010	4510	4510
t1.o5.m21	180030	180030	144030	144030	108030	108030
t1.o5.at2	7510	7510	6010	6010	4510	4510
t1.o8.m31/m32	300020	300020	240020	240020	180020	180020
t2.o2.m21	144030	108030	108030	180030	180030	144030
t2.o2.at2	6010	4510	4510	7510	7510	6010
t2.o3.m31/m32	96020	72020	72020	120020	120020	96020
t2.o3.at3	6010	4510	4510	7510	7510	6010
t2.o6.m11	96010	72010	72010	120010	120010	96010
t2.o6.at1	6010	4510	4510	7510	7510	6010
t2.o9.m31/m32	240020	180020	180020	300020	300020	240020
t3.o4.m31/m32	216020	288020	360020	216020	288020	360020
t3.o4.at3	4510	6010	7510	4510	6010	7510
t3.o7.m11	144010	192010	240010	144010	192010	240010
t3.o7.at1	4510	6010	7510	4510	6010	7510
t3.o10.m21	108030	144030	180030	108030	144030	180030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	360010	360010	240010	240010	120010	120010
t1.o1.at1	9010	9010	6010	6010	3010	3010
t1.o5.m21	216030	216030	144030	144030	72030	72030
t1.o5.at2	9010	9010	6010	6010	3010	3010
t1.o8.m31/m32	360020	360020	240020	240020	120020	120020
t2.o2.m21	144030	72030	72030	216030	216030	144030
t2.o2.at2	6010	3010	3010	9010	9010	6010
t2.o3.m31/m32	96020	48020	48020	144020	144020	96020
t2.o3.at3	6010	3010	3010	9010	9010	6010
t2.o6.m11	96010	48010	48010	144010	144010	96010
t2.o6.at1	6010	3010	3010	9010	9010	6010
t2.o9.m31/m32	240020	120020	120020	360020	360020	240020
t3.o4.m31/m32	144020	288020	432020	144020	288020	432020
t3.o4.at3	3010	6010	9010	3010	6010	9010
t3.o7.m11	96010	192010	288010	96010	192010	288010
t3.o7.at1	3010	6010	9010	3010	6010	9010
t3.o10.m21	72030	144030	216030	72030	144030	216030

Casos política 3. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	300010	300010	240010	240010	180010	180010
t1.o1.at1	5010	5010	4010	4010	3010	3010
t1.o5.m21	180030	180030	144030	144030	108030	108030
t1.o5.at2	5010	5010	4010	4010	3010	3010
t1.o8.m31/m32	300020	300020	240020	240020	180020	180020
t2.o2.m21	144030	108030	108030	180030	180030	144030
t2.o2.at2	4010	3010	3010	5010	5010	4010
t2.o3.m31/m32	96020	72020	72020	120020	120020	96020
t2.o3.at3	4010	3010	3010	5010	5010	4010
t2.o6.m11	96010	72010	72010	120010	120010	96010
t2.o6.at1	4010	3010	3010	5010	5010	4010
t2.o9.m31/m32	240020	180020	180020	300020	300020	240020
t3.o4.m31/m32	216020	288020	360020	216020	288020	360020
t3.o4.at3	3010	4010	5010	3010	4010	5010
t3.o7.m11	144010	192010	240010	144010	192010	240010
t3.o7.at1	3010	4010	5010	3010	4010	5010
t3.o10.m21	108030	144030	180030	108030	144030	180030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	360010	360010	240010	240010	120010	120010
t1.o1.at1	6010	6010	4010	4010	2010	2010
t1.o5.m21	216030	216030	144030	144030	72030	72030
t1.o5.at2	6010	6010	4010	4010	2010	2010
t1.o8.m31/m32	360020	360020	240020	240020	120020	120020
t2.o2.m21	144030	72030	72030	216030	216030	144030
t2.o2.at2	4010	2010	2010	6010	6010	4010
t2.o3.m31/m32	96020	48020	48020	144020	144020	96020
t2.o3.at3	4010	2010	2010	6010	6010	4010
t2.o6.m11	96010	48010	48010	144010	144010	96010
t2.o6.at1	4010	2010	2010	6010	6010	4010
t2.o9.m31/m32	240020	120020	120020	360020	360020	240020
t3.o4.m31/m32	144020	288020	432020	144020	288020	432020
t3.o4.at3	2010	4010	6010	2010	4010	6010
t3.o7.m11	96010	192010	288010	96010	192010	288010
t3.o7.at1	2010	4010	6010	2010	4010	6010
t3.o10.m21	72030	144030	216030	72030	144030	216030

Casos política 4. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	300010	300010	240010	240010	180010	180010
t1.o1.at1	3760	3760	3010	3010	2260	2260
t1.o5.m21	180030	180030	144030	144030	108030	108030
t1.o5.at2	3760	3760	3010	3010	2260	2260
t1.o8.m31/m32	300020	300020	240020	240020	180020	180020
t2.o2.m21	144030	108030	108030	180030	180030	144030
t2.o2.at2	3010	2260	2260	3760	3760	3010
t2.o3.m31/m32	96020	72020	72020	120020	120020	96020
t2.o3.at3	3010	2260	2260	3760	3760	3010
t2.o6.m11	96010	72010	72010	120010	120010	96010
t2.o6.at1	3010	2260	2260	3760	3760	3010
t2.o9.m31/m32	240020	180020	180020	300020	300020	240020
t3.o4.m31/m32	216020	288020	360020	216020	288020	360020
t3.o4.at3	2260	3010	3760	2260	3010	3760
t3.o7.m11	144010	192010	240010	144010	192010	240010
t3.o7.at1	2260	3010	3760	2260	3010	3760
t3.o10.m21	108030	144030	180030	108030	144030	180030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	360010	360010	240010	240010	120010	120010
t1.o1.at1	4510	4510	3010	3010	1510	1510
t1.o5.m21	216030	216030	144030	144030	72030	72030
t1.o5.at2	4510	4510	3010	3010	1510	1510
t1.o8.m31/m32	360020	360020	240020	240020	120020	120020
t2.o2.m21	144030	72030	72030	216030	216030	144030
t2.o2.at2	3010	1510	1510	4510	4510	3010
t2.o3.m31/m32	96020	48020	48020	144020	144020	96020
t2.o3.at3	3010	1510	1510	4510	4510	3010
t2.o6.m11	96010	48010	48010	144010	144010	96010
t2.o6.at1	3010	1510	1510	4510	4510	3010
t2.o9.m31/m32	240020	120020	120020	360020	360020	240020
t3.o4.m31/m32	144020	288020	432020	144020	288020	432020
t3.o4.at3	1510	3010	4510	1510	3010	4510
t3.o7.m11	96010	192010	288010	96010	192010	288010
t3.o7.at1	1510	3010	4510	1510	3010	4510
t3.o10.m21	72030	144030	216030	72030	144030	216030

ANEXO C. PARÁMETROS PS DE LAS INSTANCIAS

Casos política 1. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	300	300	240	240	180	180	360	360	240	240	120	120
t1.o1.at1	20	20	17	17	14	14	23	23	17	17	11	11
t1.o5.m21	180	180	144	144	108	108	216	216	144	144	72	72
t1.o5.at2	20	20	17	17	14	14	23	23	17	17	11	11
t1.o8.m31/m32	300	300	240	240	180	180	360	360	240	240	120	120
t2.o2.m21	144	108	108	180	180	144	144	72	72	216	216	144
t2.o2.at2	17	14	14	20	20	17	17	11	11	23	23	17
t2.o3.m31/m32	96	72	72	120	120	96	96	48	48	144	144	96
t2.o3.at3	17	14	14	20	20	17	17	11	11	23	23	17
t2.o6.m11	96	72	72	120	120	96	96	48	48	144	144	96
t2.o6.at1	17	14	14	20	20	17	17	11	11	23	23	17
t2.o9.m31/m32	240	180	180	300	300	240	240	120	120	360	360	240
t3.o4.m31/m32	216	288	360	216	288	360	144	288	432	144	288	432
t3.o4.at3	14	17	20	14	17	20	11	17	23	11	17	23
t3.o7.m11	144	192	240	144	192	240	96	192	288	96	192	288
t3.o7.at1	14	17	20	14	17	20	11	17	23	11	17	23
t3.o10.m21	108	144	180	108	144	180	72	144	216	72	144	216

Casos política 2. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	150	150	120	120	90	90	180	180	120	120	60	60
t1.o1.at1	12,5	12,5	11	11	9,5	9,5	14	14	11	11	8	8
t1.o5.m21	90	90	72	72	54	54	108	108	72	72	36	36
t1.o5.at2	12,5	12,5	11	11	9,5	9,5	14	14	11	11	8	8
t1.o8.m31/m32	150	150	120	120	90	90	180	180	120	120	60	60
t2.o2.m21	72	54	54	90	90	72	72	36	36	108	108	72
t2.o2.at2	11	9,5	9,5	12,5	12,5	11	11	8	8	14	14	11
t2.o3.m31/m32	48	36	36	60	60	48	48	24	24	72	72	48
t2.o3.at3	11	9,5	9,5	12,5	12,5	11	11	8	8	14	14	11
t2.o6.m11	48	36	36	60	60	48	48	24	24	72	72	48
t2.o6.at1	11	9,5	9,5	12,5	12,5	11	11	8	8	14	14	11
t2.o9.m31/m32	120	90	90	150	150	120	120	60	60	180	180	120
t3.o4.m31/m32	108	144	180	108	144	180	72	144	216	72	144	216
t3.o4.at3	9,5	11	12,5	9,5	11	12,5	8	11	14	8	11	14
t3.o7.m11	72	96	120	72	96	120	48	96	144	48	96	144
t3.o7.at1	9,5	11	12,5	9,5	11	12,5	8	11	14	8	11	14
t3.o10.m21	54	72	90	54	72	90	36	72	108	36	72	108

Casos política 3. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	100	100	80	80	60	60	120	120	80	80	40	40
t1.o1.at1	10	10	9	9	8	8	11	11	9	9	7	7
t1.o5.m21	60	60	48	48	36	36	72	72	48	48	24	24
t1.o5.at2	10	10	9	9	8	8	11	11	9	9	7	7
t1.o8.m31/m32	100	100	80	80	60	60	120	120	80	80	40	40
t2.o2.m21	48	36	36	60	60	48	48	24	24	72	72	48
t2.o2.at2	9	8	8	10	10	9	9	7	7	11	11	9
t2.o3.m31/m32	32	24	24	40	40	32	32	16	16	48	48	32
t2.o3.at3	9	8	8	10	10	9	9	7	7	11	11	9
t2.o6.m11	32	24	24	40	40	32	32	16	16	48	48	32
t2.o6.at1	9	8	8	10	10	9	9	7	7	11	11	9
t2.o9.m31/m32	80	60	60	100	100	80	80	40	40	120	120	80
t3.o4.m31/m32	72	96	120	72	96	120	48	96	144	48	96	144
t3.o4.at3	8	9	10	8	9	10	7	9	11	7	9	11
t3.o7.m11	48	64	80	48	64	80	32	64	96	32	64	96
t3.o7.at1	8	9	10	8	9	10	7	9	11	7	9	11
t3.o10.m21	36	48	60	36	48	60	24	48	72	24	48	72

Casos política 4. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	75	75	60	60	45	45	90	90	60	60	30	30
t1.o1.at1	8,75	8,75	8	8	7,25	7,25	9,5	9,5	8	8	6,5	6,5
t1.o5.m21	45	45	36	36	27	27	54	54	36	36	18	18
t1.o5.at2	8,75	8,75	8	8	7,25	7,25	9,5	9,5	8	8	6,5	6,5
t1.o8.m31/m32	75	75	60	60	45	45	90	90	60	60	30	30
t2.o2.m21	36	27	27	45	45	36	36	18	18	54	54	36
t2.o2.at2	8	7,25	7,25	8,75	8,75	8	8	6,5	6,5	9,5	9,5	8
t2.o3.m31/m32	24	18	18	30	30	24	24	12	12	36	36	24
t2.o3.at3	8	7,25	7,25	8,75	8,75	8	8	6,5	6,5	9,5	9,5	8
t2.o6.m11	24	18	18	30	30	24	24	12	12	36	36	24
t2.o6.at1	8	7,25	7,25	8,75	8,75	8	8	6,5	6,5	9,5	9,5	8
t2.o9.m31/m32	60	45	45	75	75	60	60	30	30	90	90	60
t3.o4.m31/m32	54	72	90	54	72	90	36	72	108	36	72	108
t3.o4.at3	7,25	8	8,75	7,25	8	8,75	6,5	8	9,5	6,5	8	9,5
t3.o7.m11	36	48	60	36	48	60	24	48	72	24	48	72
t3.o7.at1	7,25	8	8,75	7,25	8	8,75	6,5	8	9,5	6,5	8	9,5
t3.o10.m21	27	36	45	27	36	45	18	36	54	18	36	54

Casos política 1. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	30000	30000	24000	24000	18000	18000	36000	36000	24000	24000	12000	12000
t1.o1.at1	1505	1505	1205	1205	905	905	1805	1805	1205	1205	605	605
t1.o5.m21	18000	18000	14400	14400	10800	10800	21600	21600	14400	14400	7200	7200
t1.o5.at2	1505	1505	1205	1205	905	905	1805	1805	1205	1205	605	605
t1.o8.m31/m32	30000	30000	24000	24000	18000	18000	36000	36000	24000	24000	12000	12000
t2.o2.m21	14400	10800	10800	18000	18000	14400	14400	7200	7200	21600	21600	14400
t2.o2.at2	1205	905	905	1505	1505	1205	1205	605	605	1805	1805	1205
t2.o3.m31/m32	9600	7200	7200	12000	12000	9600	9600	4800	4800	14400	14400	9600
t2.o3.at3	1205	905	905	1505	1505	1205	1205	605	605	1805	1805	1205
t2.o6.m11	9600	7200	7200	12000	12000	9600	9600	4800	4800	14400	14400	9600
t2.o6.at1	1205	905	905	1505	1505	1205	1205	605	605	1805	1805	1205
t2.o9.m31/m32	24000	18000	18000	30000	30000	24000	24000	12000	12000	36000	36000	24000
t3.o4.m31/m32	21600	28800	36000	21600	28800	36000	14400	28800	43200	14400	28800	43200
t3.o4.at3	905	1205	1505	905	1205	1505	605	1205	1805	605	1205	1805
t3.o7.m11	14400	19200	24000	14400	19200	24000	9600	19200	28800	9600	19200	28800
t3.o7.at1	905	1205	1505	905	1205	1505	605	1205	1805	605	1205	1805
t3.o10.m21	10800	14400	18000	10800	14400	18000	7200	14400	21600	7200	14400	21600

Casos política 2. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	15000	15000	12000	12000	9000	9000	18000	18000	12000	12000	6000	6000
t1.o1.at1	755	755	605	605	455	455	905	905	605	605	305	305
t1.o5.m21	9000	9000	7200	7200	5400	5400	10800	10800	7200	7200	3600	3600
t1.o5.at2	755	755	605	605	455	455	905	905	605	605	305	305
t1.o8.m31/m32	15000	15000	12000	12000	9000	9000	18000	18000	12000	12000	6000	6000
t2.o2.m21	7200	5400	5400	9000	9000	7200	7200	3600	3600	10800	10800	7200
t2.o2.at2	605	455	455	755	755	605	605	305	305	905	905	605
t2.o3.m31/m32	4800	3600	3600	6000	6000	4800	4800	2400	2400	7200	7200	4800
t2.o3.at3	605	455	455	755	755	605	605	305	305	905	905	605
t2.o6.m11	4800	3600	3600	6000	6000	4800	4800	2400	2400	7200	7200	4800
t2.o6.at1	605	455	455	755	755	605	605	305	305	905	905	605
t2.o9.m31/m32	12000	9000	9000	15000	15000	12000	12000	6000	6000	18000	18000	12000
t3.o4.m31/m32	10800	14400	18000	10800	14400	18000	7200	14400	21600	7200	14400	21600
t3.o4.at3	455	605	755	455	605	755	305	605	905	305	605	905
t3.o7.m11	7200	9600	12000	7200	9600	12000	4800	9600	14400	4800	9600	14400
t3.o7.at1	455	605	755	455	605	755	305	605	905	305	605	905
t3.o10.m21	5400	7200	9000	5400	7200	9000	3600	7200	10800	3600	7200	10800

Casos política 3. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	10000	10000	8000	8000	6000	6000	12000	12000	8000	8000	4000	4000
t1.o1.at1	505	505	405	405	305	305	605	605	405	405	205	205
t1.o5.m21	6000	6000	4800	4800	3600	3600	7200	7200	4800	4800	2400	2400
t1.o5.at2	505	505	405	405	305	305	605	605	405	405	205	205
t1.o8.m31/m32	10000	10000	8000	8000	6000	6000	12000	12000	8000	8000	4000	4000
t2.o2.m21	4800	3600	3600	6000	6000	4800	4800	2400	2400	7200	7200	4800
t2.o2.at2	405	305	305	505	505	405	405	205	205	605	605	405
t2.o3.m31/m32	3200	2400	2400	4000	4000	3200	3200	1600	1600	4800	4800	3200
t2.o3.at3	405	305	305	505	505	405	405	205	205	605	605	405
t2.o6.m11	3200	2400	2400	4000	4000	3200	3200	1600	1600	4800	4800	3200
t2.o6.at1	405	305	305	505	505	405	405	205	205	605	605	405
t2.o9.m31/m32	8000	6000	6000	10000	10000	8000	8000	4000	4000	12000	12000	8000
t3.o4.m31/m32	7200	9600	12000	7200	9600	12000	4800	9600	14400	4800	9600	14400
t3.o4.at3	305	405	505	305	405	505	205	405	605	205	405	605
t3.o7.m11	4800	6400	8000	4800	6400	8000	3200	6400	9600	3200	6400	9600
t3.o7.at1	305	405	505	305	405	505	205	405	605	205	405	605
t3.o10.m21	3600	4800	6000	3600	4800	6000	2400	4800	7200	2400	4800	7200

Casos política 4. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	7500	7500	6000	6000	4500	4500	9000	9000	6000	6000	3000	3000
t1.o1.at1	380	380	305	305	230	230	455	455	305	305	155	155
t1.o5.m21	4500	4500	3600	3600	2700	2700	5400	5400	3600	3600	1800	1800
t1.o5.at2	380	380	305	305	230	230	455	455	305	305	155	155
t1.o8.m31/m32	7500	7500	6000	6000	4500	4500	9000	9000	6000	6000	3000	3000
t2.o2.m21	3600	2700	2700	4500	4500	3600	3600	1800	1800	5400	5400	3600
t2.o2.at2	305	230	230	380	380	305	305	155	155	455	455	305
t2.o3.m31/m32	2400	1800	1800	3000	3000	2400	2400	1200	1200	3600	3600	2400
t2.o3.at3	305	230	230	380	380	305	305	155	155	455	455	305
t2.o6.m11	2400	1800	1800	3000	3000	2400	2400	1200	1200	3600	3600	2400
t2.o6.at1	305	230	230	380	380	305	305	155	155	455	455	305
t2.o9.m31/m32	6000	4500	4500	7500	7500	6000	6000	3000	3000	9000	9000	6000
t3.o4.m31/m32	5400	7200	9000	5400	7200	9000	3600	7200	10800	3600	7200	10800
t3.o4.at3	230	305	380	230	305	380	155	305	455	155	305	455
t3.o7.m11	3600	4800	6000	3600	4800	6000	2400	4800	7200	2400	4800	7200
t3.o7.at1	230	305	380	230	305	380	155	305	455	155	305	455
t3.o10.m21	2700	3600	4500	2700	3600	4500	1800	3600	5400	1800	3600	5400

Casos política 1. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	300000	300000	240000	240000	180000	180000
t1.o1.at1	15005	15005	12005	12005	9005	9005
t1.o5.m21	180000	180000	144000	144000	108000	108000
t1.o5.at2	15005	15005	12005	12005	9005	9005
t1.o8.m31/m32	300000	300000	240000	240000	180000	180000
t2.o2.m21	144000	108000	108000	180000	180000	144000
t2.o2.at2	12005	9005	9005	15005	15005	12005
t2.o3.m31/m32	96000	72000	72000	120000	120000	96000
t2.o3.at3	12005	9005	9005	15005	15005	12005
t2.o6.m11	96000	72000	72000	120000	120000	96000
t2.o6.at1	12005	9005	9005	15005	15005	12005
t2.o9.m31/m32	240000	180000	180000	300000	300000	240000
t3.o4.m31/m32	216000	288000	360000	216000	288000	360000
t3.o4.at3	9005	12005	15005	9005	12005	15005
t3.o7.m11	144000	192000	240000	144000	192000	240000
t3.o7.at1	9005	12005	15005	9005	12005	15005
t3.o10.m21	108000	144000	180000	108000	144000	180000

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	360000	360000	240000	240000	120000	120000
t1.o1.at1	18005	18005	12005	12005	6005	6005
t1.o5.m21	216000	216000	144000	144000	72000	72000
t1.o5.at2	18005	18005	12005	12005	6005	6005
t1.o8.m31/m32	360000	360000	240000	240000	120000	120000
t2.o2.m21	144000	72000	72000	216000	216000	144000
t2.o2.at2	12005	6005	6005	18005	18005	12005
t2.o3.m31/m32	96000	48000	48000	144000	144000	96000
t2.o3.at3	12005	6005	6005	18005	18005	12005
t2.o6.m11	96000	48000	48000	144000	144000	96000
t2.o6.at1	12005	6005	6005	18005	18005	12005
t2.o9.m31/m32	240000	120000	120000	360000	360000	240000
t3.o4.m31/m32	144000	288000	432000	144000	288000	432000
t3.o4.at3	6005	12005	18005	6005	12005	18005
t3.o7.m11	96000	192000	288000	96000	192000	288000
t3.o7.at1	6005	12005	18005	6005	12005	18005
t3.o10.m21	72000	144000	216000	72000	144000	216000

Casos política 2. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	150000	150000	120000	120000	90000	90000
t1.o1.at1	7505	7505	6005	6005	4505	4505
t1.o5.m21	90000	90000	72000	72000	54000	54000
t1.o5.at2	7505	7505	6005	6005	4505	4505
t1.o8.m31/m32	150000	150000	120000	120000	90000	90000
t2.o2.m21	72000	54000	54000	90000	90000	72000
t2.o2.at2	6005	4505	4505	7505	7505	6005
t2.o3.m31/m32	48000	36000	36000	60000	60000	48000
t2.o3.at3	6005	4505	4505	7505	7505	6005
t2.o6.m11	48000	36000	36000	60000	60000	48000
t2.o6.at1	6005	4505	4505	7505	7505	6005
t2.o9.m31/m32	120000	90000	90000	150000	150000	120000
t3.o4.m31/m32	108000	144000	180000	108000	144000	180000
t3.o4.at3	4505	6005	7505	4505	6005	7505
t3.o7.m11	72000	96000	120000	72000	96000	120000
t3.o7.at1	4505	6005	7505	4505	6005	7505
t3.o10.m21	54000	72000	90000	54000	72000	90000

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	180000	180000	120000	120000	60000	60000
t1.o1.at1	9005	9005	6005	6005	3005	3005
t1.o5.m21	108000	108000	72000	72000	36000	36000
t1.o5.at2	9005	9005	6005	6005	3005	3005
t1.o8.m31/m32	180000	180000	120000	120000	60000	60000
t2.o2.m21	72000	36000	36000	108000	108000	72000
t2.o2.at2	6005	3005	3005	9005	9005	6005
t2.o3.m31/m32	48000	24000	24000	72000	72000	48000
t2.o3.at3	6005	3005	3005	9005	9005	6005
t2.o6.m11	48000	24000	24000	72000	72000	48000
t2.o6.at1	6005	3005	3005	9005	9005	6005
t2.o9.m31/m32	120000	60000	60000	180000	180000	120000
t3.o4.m31/m32	72000	144000	216000	72000	144000	216000
t3.o4.at3	3005	6005	9005	3005	6005	9005
t3.o7.m11	48000	96000	144000	48000	96000	144000
t3.o7.at1	3005	6005	9005	3005	6005	9005
t3.o10.m21	36000	72000	108000	36000	72000	108000

Casos política 3. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	100000	100000	80000	80000	60000	60000
t1.o1.at1	5005	5005	4005	4005	3005	3005
t1.o5.m21	60000	60000	48000	48000	36000	36000
t1.o5.at2	5005	5005	4005	4005	3005	3005
t1.o8.m31/m32	100000	100000	80000	80000	60000	60000
t2.o2.m21	48000	36000	36000	60000	60000	48000
t2.o2.at2	4005	3005	3005	5005	5005	4005
t2.o3.m31/m32	32000	24000	24000	40000	40000	32000
t2.o3.at3	4005	3005	3005	5005	5005	4005
t2.o6.m11	32000	24000	24000	40000	40000	32000
t2.o6.at1	4005	3005	3005	5005	5005	4005
t2.o9.m31/m32	80000	60000	60000	100000	100000	80000
t3.o4.m31/m32	72000	96000	120000	72000	96000	120000
t3.o4.at3	3005	4005	5005	3005	4005	5005
t3.o7.m11	48000	64000	80000	48000	64000	80000
t3.o7.at1	3005	4005	5005	3005	4005	5005
t3.o10.m21	36000	48000	60000	36000	48000	60000

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	120000	120000	80000	80000	40000	40000
t1.o1.at1	6005	6005	4005	4005	2005	2005
t1.o5.m21	72000	72000	48000	48000	24000	24000
t1.o5.at2	6005	6005	4005	4005	2005	2005
t1.o8.m31/m32	120000	120000	80000	80000	40000	40000
t2.o2.m21	48000	24000	24000	72000	72000	48000
t2.o2.at2	4005	2005	2005	6005	6005	4005
t2.o3.m31/m32	32000	16000	16000	48000	48000	32000
t2.o3.at3	4005	2005	2005	6005	6005	4005
t2.o6.m11	32000	16000	16000	48000	48000	32000
t2.o6.at1	4005	2005	2005	6005	6005	4005
t2.o9.m31/m32	80000	40000	40000	120000	120000	80000
t3.o4.m31/m32	48000	96000	144000	48000	96000	144000
t3.o4.at3	2005	4005	6005	2005	4005	6005
t3.o7.m11	32000	64000	96000	32000	64000	96000
t3.o7.at1	2005	4005	6005	2005	4005	6005
t3.o10.m21	24000	48000	72000	24000	48000	72000

Casos política 4. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	75000	75000	60000	60000	45000	45000
t1.o1.at1	3755	3755	3005	3005	2255	2255
t1.o5.m21	45000	45000	36000	36000	27000	27000
t1.o5.at2	3755	3755	3005	3005	2255	2255
t1.o8.m31/m32	75000	75000	60000	60000	45000	45000
t2.o2.m21	36000	27000	27000	45000	45000	36000
t2.o2.at2	3005	2255	2255	3755	3755	3005
t2.o3.m31/m32	24000	18000	18000	30000	30000	24000
t2.o3.at3	3005	2255	2255	3755	3755	3005
t2.o6.m11	24000	18000	18000	30000	30000	24000
t2.o6.at1	3005	2255	2255	3755	3755	3005
t2.o9.m31/m32	60000	45000	45000	75000	75000	60000
t3.o4.m31/m32	54000	72000	90000	54000	72000	90000
t3.o4.at3	2255	3005	3755	2255	3005	3755
t3.o7.m11	36000	48000	60000	36000	48000	60000
t3.o7.at1	2255	3005	3755	2255	3005	3755
t3.o10.m21	27000	36000	45000	27000	36000	45000

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	90000	90000	60000	60000	30000	30000
t1.o1.at1	4505	4505	3005	3005	1505	1505
t1.o5.m21	54000	54000	36000	36000	18000	18000
t1.o5.at2	4505	4505	3005	3005	1505	1505
t1.o8.m31/m32	90000	90000	60000	60000	30000	30000
t2.o2.m21	36000	18000	18000	54000	54000	36000
t2.o2.at2	3005	1505	1505	4505	4505	3005
t2.o3.m31/m32	24000	12000	12000	36000	36000	24000
t2.o3.at3	3005	1505	1505	4505	4505	3005
t2.o6.m11	24000	12000	12000	36000	36000	24000
t2.o6.at1	3005	1505	1505	4505	4505	3005
t2.o9.m31/m32	60000	30000	30000	90000	90000	60000
t3.o4.m31/m32	36000	72000	108000	36000	72000	108000
t3.o4.at3	1505	3005	4505	1505	3005	4505
t3.o7.m11	24000	48000	72000	24000	48000	72000
t3.o7.at1	1505	3005	4505	1505	3005	4505
t3.o10.m21	18000	36000	54000	18000	36000	54000

ANEXO D. PARÁMETROS TT DE LAS INSTANCIAS

Casos política 1. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	310	310	250	250	190	190	370	370	250	250	130	130
t1.o1.at1	-10	-10	-13	-13	-16	-16	-7	-7	-13	-13	-19	-19
t1.o5.m21	210	210	174	174	138	138	246	246	174	174	102	102
t1.o5.at2	0	0	-3	-3	-6	-6	3	3	-3	-3	-9	-9
t1.o8.m31/m32	320	320	260	260	200	200	380	380	260	260	140	140
t2.o2.m21	174	138	138	210	210	174	174	102	102	246	246	174
t2.o2.at2	-3	-6	-6	0	0	-3	-3	-9	-9	3	3	-3
t2.o3.m31/m32	116	92	92	140	140	116	116	68	68	164	164	116
t2.o3.at3	7	4	4	10	10	7	7	1	1	13	13	7
t2.o6.m11	106	82	82	130	130	106	106	58	58	154	154	106
t2.o6.at1	-3	-6	-6	0	0	-3	-3	-9	-9	3	3	-3
t2.o9.m31/m32	260	200	200	320	320	260	260	140	140	380	380	260
t3.o4.m31/m32	236	308	380	236	308	380	164	308	452	164	308	452
t3.o4.at3	4	7	10	4	7	10	1	7	13	1	7	13
t3.o7.m11	154	202	250	154	202	250	106	202	298	106	202	298
t3.o7.at1	-16	-13	-10	-16	-13	-10	-19	-13	-7	-19	-13	-7
t3.o10.m21	138	174	210	138	174	210	102	174	246	102	174	246

Casos política 2. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	160	160	130	130	100	100	190	190	130	130	70	70
t1.o1.at1	-17,5	-17,5	-19	-19	-20,5	-20,5	-16	-16	-19	-19	-22	-22
t1.o5.m21	120	120	102	102	84	84	138	138	102	102	66	66
t1.o5.at2	-7,5	-7,5	-9	-9	-10,5	-10,5	-6	-6	-9	-9	-12	-12
t1.o8.m31/m32	170	170	140	140	110	110	200	200	140	140	80	80
t2.o2.m21	102	84	84	120	120	102	102	66	66	138	138	102
t2.o2.at2	-9	-10,5	-10,5	-7,5	-7,5	-9	-9	-12	-12	-6	-6	-9
t2.o3.m31/m32	68	56	56	80	80	68	68	44	44	92	92	68
t2.o3.at3	1	-0,5	-0,5	2,5	2,5	1	1	-2	-2	4	4	1
t2.o6.m11	58	46	46	70	70	58	58	34	34	82	82	58
t2.o6.at1	-9	-10,5	-10,5	-7,5	-7,5	-9	-9	-12	-12	-6	-6	-9
t2.o9.m31/m32	140	110	110	170	170	140	140	80	80	200	200	140
t3.o4.m31/m32	128	164	200	128	164	200	92	164	236	92	164	236
t3.o4.at3	-0,5	1	2,5	-0,5	1	2,5	-2	1	4	-2	1	4
t3.o7.m11	82	106	130	82	106	130	58	106	154	58	106	154
t3.o7.at1	-20,5	-19	-17,5	-20,5	-19	-17,5	-22	-19	-16	-22	-19	-16
t3.o10.m21	84	102	120	84	102	120	66	102	138	66	102	138

Casos política 3. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	110	110	90	90	70	70	130	130	90	90	50	50
t1.o1.at1	-20	-20	-21	-21	-22	-22	-19	-19	-21	-21	-23	-23
t1.o5.m21	90	90	78	78	66	66	102	102	78	78	54	54
t1.o5.at2	-10	-10	-11	-11	-12	-12	-9	-9	-11	-11	-13	-13
t1.o8.m31/m32	120	120	100	100	80	80	140	140	100	100	60	60
t2.o2.m21	78	66	66	90	90	78	78	54	54	102	102	78
t2.o2.at2	-11	-12	-12	-10	-10	-11	-11	-13	-13	-9	-9	-11
t2.o3.m31/m32	52	44	44	60	60	52	52	36	36	68	68	52
t2.o3.at3	-1	-2	-2	0	0	-1	-1	-3	-3	1	1	-1
t2.o6.m11	42	34	34	50	50	42	42	26	26	58	58	42
t2.o6.at1	-11	-12	-12	-10	-10	-11	-11	-13	-13	-9	-9	-11
t2.o9.m31/m32	100	80	80	120	120	100	100	60	60	140	140	100
t3.o4.m31/m32	92	116	140	92	116	140	68	116	164	68	116	164
t3.o4.at3	-2	-1	0	-2	-1	0	-3	-1	1	-3	-1	1
t3.o7.m11	58	74	90	58	74	90	42	74	106	42	74	106
t3.o7.at1	-22	-21	-20	-22	-21	-20	-23	-21	-19	-23	-21	-19
t3.o10.m21	66	78	90	66	78	90	54	78	102	54	78	102

Casos política 4. Demanda básica

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	85	85	70	70	55	55	100	100	70	70	40	40
t1.o1.at1	-21,25	-21,25	-22	-22	-22,75	-22,75	-20,5	-20,5	-22	-22	-23,5	-23,5
t1.o5.m21	75	75	66	66	57	57	84	84	66	66	48	48
t1.o5.at2	-11,25	-11,25	-12	-12	-12,75	-12,75	-10,5	-10,5	-12	-12	-13,5	-13,5
t1.o8.m31/m32	95	95	80	80	65	65	110	110	80	80	50	50
t2.o2.m21	66	57	57	75	75	66	66	48	48	84	84	66
t2.o2.at2	-12	-12,75	-12,75	-11,25	-11,25	-12	-12	-13,5	-13,5	-10,5	-10,5	-12
t2.o3.m31/m32	44	38	38	50	50	44	44	32	32	56	56	44
t2.o3.at3	-2	-2,75	-2,75	-1,25	-1,25	-2	-2	-3,5	-3,5	-0,5	-0,5	-2
t2.o6.m11	34	28	28	40	40	34	34	22	22	46	46	34
t2.o6.at1	-12	-12,75	-12,75	-11,25	-11,25	-12	-12	-13,5	-13,5	-10,5	-10,5	-12
t2.o9.m31/m32	80	65	65	95	95	80	80	50	50	110	110	80
t3.o4.m31/m32	74	92	110	74	92	110	56	92	128	56	92	128
t3.o4.at3	-2,75	-2	-1,25	-2,75	-2	-1,25	-3,5	-2	-0,5	-3,5	-2	-0,5
t3.o7.m11	46	58	70	46	58	70	34	58	82	34	58	82
t3.o7.at1	-22,75	-22	-21,25	-22,75	-22	-21,25	-23,5	-22	-20,5	-23,5	-22	-20,5
t3.o10.m21	57	66	75	57	66	75	48	66	84	48	66	84

Casos política 1. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	30010	30010	24010	24010	18010	18010	36010	36010	24010	24010	12010	12010
t1.o1.at1	1475	1475	1175	1175	875	875	1775	1775	1175	1175	575	575
t1.o5.m21	18030	18030	14430	14430	10830	10830	21630	21630	14430	14430	7230	7230
t1.o5.at2	1485	1485	1185	1185	885	885	1785	1785	1185	1185	585	585
t1.o8.m31/m32	30020	30020	24020	24020	18020	18020	36020	36020	24020	24020	12020	12020
t2.o2.m21	14430	10830	10830	18030	18030	14430	14430	7230	7230	21630	21630	14430
t2.o2.at2	1185	885	885	1485	1485	1185	1185	585	585	1785	1785	1185
t2.o3.m31/m32	9620	7220	7220	12020	12020	9620	9620	4820	4820	14420	14420	9620
t2.o3.at3	1195	895	895	1495	1495	1195	1195	595	595	1795	1795	1195
t2.o6.m11	9610	7210	7210	12010	12010	9610	9610	4810	4810	14410	14410	9610
t2.o6.at1	1185	885	885	1485	1485	1185	1185	585	585	1785	1785	1185
t2.o9.m31/m32	24020	18020	18020	30020	30020	24020	24020	12020	12020	36020	36020	24020
t3.o4.m31/m32	21620	28820	36020	21620	28820	36020	14420	28820	43220	14420	28820	43220
t3.o4.at3	895	1195	1495	895	1195	1495	595	1195	1795	595	1195	1795
t3.o7.m11	14410	19210	24010	14410	19210	24010	9610	19210	28810	9610	19210	28810
t3.o7.at1	875	1175	1475	875	1175	1475	575	1175	1775	575	1175	1775
t3.o10.m21	10830	14430	18030	10830	14430	18030	7230	14430	21630	7230	14430	21630

Casos política 2. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	15010	15010	12010	12010	9010	9010	18010	18010	12010	12010	6010	6010
t1.o1.at1	725	725	575	575	425	425	875	875	575	575	275	275
t1.o5.m21	9030	9030	7230	7230	5430	5430	10830	10830	7230	7230	3630	3630
t1.o5.at2	735	735	585	585	435	435	885	885	585	585	285	285
t1.o8.m31/m32	15020	15020	12020	12020	9020	9020	18020	18020	12020	12020	6020	6020
t2.o2.m21	7230	5430	5430	9030	9030	7230	7230	3630	3630	10830	10830	7230
t2.o2.at2	585	435	435	735	735	585	585	285	285	885	885	585
t2.o3.m31/m32	4820	3620	3620	6020	6020	4820	4820	2420	2420	7220	7220	4820
t2.o3.at3	595	445	445	745	745	595	595	295	295	895	895	595
t2.o6.m11	4810	3610	3610	6010	6010	4810	4810	2410	2410	7210	7210	4810
t2.o6.at1	585	435	435	735	735	585	585	285	285	885	885	585
t2.o9.m31/m32	12020	9020	9020	15020	15020	12020	12020	6020	6020	18020	18020	12020
t3.o4.m31/m32	10820	14420	18020	10820	14420	18020	7220	14420	21620	7220	14420	21620
t3.o4.at3	445	595	745	445	595	745	295	595	895	295	595	895
t3.o7.m11	7210	9610	12010	7210	9610	12010	4810	9610	14410	4810	9610	14410
t3.o7.at1	425	575	725	425	575	725	275	575	875	275	575	875
t3.o10.m21	5430	7230	9030	5430	7230	9030	3630	7230	10830	3630	7230	10830

Casos política 3. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	10010	10010	8010	8010	6010	6010	12010	12010	8010	8010	4010	4010
t1.o1.at1	475	475	375	375	275	275	575	575	375	375	175	175
t1.o5.m21	6030	6030	4830	4830	3630	3630	7230	7230	4830	4830	2430	2430
t1.o5.at2	485	485	385	385	285	285	585	585	385	385	185	185
t1.o8.m31/m32	10020	10020	8020	8020	6020	6020	12020	12020	8020	8020	4020	4020
t2.o2.m21	4830	3630	3630	6030	6030	4830	4830	2430	2430	7230	7230	4830
t2.o2.at2	385	285	285	485	485	385	385	185	185	585	585	385
t2.o3.m31/m32	3220	2420	2420	4020	4020	3220	3220	1620	1620	4820	4820	3220
t2.o3.at3	395	295	295	495	495	395	395	195	195	595	595	395
t2.o6.m11	3210	2410	2410	4010	4010	3210	3210	1610	1610	4810	4810	3210
t2.o6.at1	385	285	285	485	485	385	385	185	185	585	585	385
t2.o9.m31/m32	8020	6020	6020	10020	10020	8020	8020	4020	4020	12020	12020	8020
t3.o4.m31/m32	7220	9620	12020	7220	9620	12020	4820	9620	14420	4820	9620	14420
t3.o4.at3	295	395	495	295	395	495	195	395	595	195	395	595
t3.o7.m11	4810	6410	8010	4810	6410	8010	3210	6410	9610	3210	6410	9610
t3.o7.at1	275	375	475	275	375	475	175	375	575	175	375	575
t3.o10.m21	3630	4830	6030	3630	4830	6030	2430	4830	7230	2430	4830	7230

Casos política 4. Demanda básica * 100

Operación	Mezcla											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	7510	7510	6010	6010	4510	4510	9010	9010	6010	6010	3010	3010
t1.o1.at1	350	350	275	275	200	200	425	425	275	275	125	125
t1.o5.m21	4530	4530	3630	3630	2730	2730	5430	5430	3630	3630	1830	1830
t1.o5.at2	360	360	285	285	210	210	435	435	285	285	135	135
t1.o8.m31/m32	7520	7520	6020	6020	4520	4520	9020	9020	6020	6020	3020	3020
t2.o2.m21	3630	2730	2730	4530	4530	3630	3630	1830	1830	5430	5430	3630
t2.o2.at2	285	210	210	360	360	285	285	135	135	435	435	285
t2.o3.m31/m32	2420	1820	1820	3020	3020	2420	2420	1220	1220	3620	3620	2420
t2.o3.at3	295	220	220	370	370	295	295	145	145	445	445	295
t2.o6.m11	2410	1810	1810	3010	3010	2410	2410	1210	1210	3610	3610	2410
t2.o6.at1	285	210	210	360	360	285	285	135	135	435	435	285
t2.o9.m31/m32	6020	4520	4520	7520	7520	6020	6020	3020	3020	9020	9020	6020
t3.o4.m31/m32	5420	7220	9020	5420	7220	9020	3620	7220	10820	3620	7220	10820
t3.o4.at3	220	295	370	220	295	370	145	295	445	145	295	445
t3.o7.m11	3610	4810	6010	3610	4810	6010	2410	4810	7210	2410	4810	7210
t3.o7.at1	200	275	350	200	275	350	125	275	425	125	275	425
t3.o10.m21	2730	3630	4530	2730	3630	4530	1830	3630	5430	1830	3630	5430

Casos política 1. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	300010	300010	240010	240010	180010	180010
t1.o1.at1	14975	14975	11975	11975	8975	8975
t1.o5.m21	180030	180030	144030	144030	108030	108030
t1.o5.at2	14985	14985	11985	11985	8985	8985
t1.o8.m31/m32	300020	300020	240020	240020	180020	180020
t2.o2.m21	144030	108030	108030	180030	180030	144030
t2.o2.at2	11985	8985	8985	14985	14985	11985
t2.o3.m31/m32	96020	72020	72020	120020	120020	96020
t2.o3.at3	11995	8995	8995	14995	14995	11995
t2.o6.m11	96010	72010	72010	120010	120010	96010
t2.o6.at1	11985	8985	8985	14985	14985	11985
t2.o9.m31/m32	240020	180020	180020	300020	300020	240020
t3.o4.m31/m32	216020	288020	360020	216020	288020	360020
t3.o4.at3	8995	11995	14995	8995	11995	14995
t3.o7.m11	144010	192010	240010	144010	192010	240010
t3.o7.at1	8975	11975	14975	8975	11975	14975
t3.o10.m21	108030	144030	180030	108030	144030	180030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	360010	360010	240010	240010	120010	120010
t1.o1.at1	17975	17975	11975	11975	5975	5975
t1.o5.m21	216030	216030	144030	144030	72030	72030
t1.o5.at2	17985	17985	11985	11985	5985	5985
t1.o8.m31/m32	360020	360020	240020	240020	120020	120020
t2.o2.m21	144030	72030	72030	216030	216030	144030
t2.o2.at2	11985	5985	5985	17985	17985	11985
t2.o3.m31/m32	96020	48020	48020	144020	144020	96020
t2.o3.at3	11995	5995	5995	17995	17995	11995
t2.o6.m11	96010	48010	48010	144010	144010	96010
t2.o6.at1	11985	5985	5985	17985	17985	11985
t2.o9.m31/m32	240020	120020	120020	360020	360020	240020
t3.o4.m31/m32	144020	288020	432020	144020	288020	432020
t3.o4.at3	5995	11995	17995	5995	11995	17995
t3.o7.m11	96010	192010	288010	96010	192010	288010
t3.o7.at1	5975	11975	17975	5975	11975	17975
t3.o10.m21	72030	144030	216030	72030	144030	216030

Casos política 2. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	150010	150010	120010	120010	90010	90010
t1.o1.at1	7475	7475	5975	5975	4475	4475
t1.o5.m21	90030	90030	72030	72030	54030	54030
t1.o5.at2	7485	7485	5985	5985	4485	4485
t1.o8.m31/m32	150020	150020	120020	120020	90020	90020
t2.o2.m21	72030	54030	54030	90030	90030	72030
t2.o2.at2	5985	4485	4485	7485	7485	5985
t2.o3.m31/m32	48020	36020	36020	60020	60020	48020
t2.o3.at3	5995	4495	4495	7495	7495	5995
t2.o6.m11	48010	36010	36010	60010	60010	48010
t2.o6.at1	5985	4485	4485	7485	7485	5985
t2.o9.m31/m32	120020	90020	90020	150020	150020	120020
t3.o4.m31/m32	108020	144020	180020	108020	144020	180020
t3.o4.at3	4495	5995	7495	4495	5995	7495
t3.o7.m11	72010	96010	120010	72010	96010	120010
t3.o7.at1	4475	5975	7475	4475	5975	7475
t3.o10.m21	54030	72030	90030	54030	72030	90030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	180010	180010	120010	120010	60010	60010
t1.o1.at1	8975	8975	5975	5975	2975	2975
t1.o5.m21	108030	108030	72030	72030	36030	36030
t1.o5.at2	8985	8985	5985	5985	2985	2985
t1.o8.m31/m32	180020	180020	120020	120020	60020	60020
t2.o2.m21	72030	36030	36030	108030	108030	72030
t2.o2.at2	5985	2985	2985	8985	8985	5985
t2.o3.m31/m32	48020	24020	24020	72020	72020	48020
t2.o3.at3	5995	2995	2995	8995	8995	5995
t2.o6.m11	48010	24010	24010	72010	72010	48010
t2.o6.at1	5985	2985	2985	8985	8985	5985
t2.o9.m31/m32	120020	60020	60020	180020	180020	120020
t3.o4.m31/m32	72020	144020	216020	72020	144020	216020
t3.o4.at3	2995	5995	8995	2995	5995	8995
t3.o7.m11	48010	96010	144010	48010	96010	144010
t3.o7.at1	2975	5975	8975	2975	5975	8975
t3.o10.m21	36000	72000	108000	36000	72000	108000

Casos política 3. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	100010	100010	80010	80010	60010	60010
t1.o1.at1	4975	4975	3975	3975	2975	2975
t1.o5.m21	60030	60030	48030	48030	36030	36030
t1.o5.at2	4985	4985	3985	3985	2985	2985
t1.o8.m31/m32	100020	100020	80020	80020	60020	60020
t2.o2.m21	48030	36030	36030	60030	60030	48030
t2.o2.at2	3985	2985	2985	4985	4985	3985
t2.o3.m31/m32	32020	24020	24020	40020	40020	32020
t2.o3.at3	3995	2995	2995	4995	4995	3995
t2.o6.m11	32010	24010	24010	40010	40010	32010
t2.o6.at1	3985	2985	2985	4985	4985	3985
t2.o9.m31/m32	80020	60020	60020	100020	100020	80020
t3.o4.m31/m32	72020	96020	120020	72020	96020	120020
t3.o4.at3	2995	3995	4995	2995	3995	4995
t3.o7.m11	48010	64010	80010	48010	64010	80010
t3.o7.at1	2975	3975	4975	2975	3975	4975
t3.o10.m21	36030	48030	60030	36030	48030	60030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	120010	120010	80010	80010	40010	40010
t1.o1.at1	5975	5975	3975	3975	1975	1975
t1.o5.m21	72030	72030	48030	48030	24030	24030
t1.o5.at2	5985	5985	3985	3985	1985	1985
t1.o8.m31/m32	120020	120020	80020	80020	40020	40020
t2.o2.m21	48030	24030	24030	72030	72030	48030
t2.o2.at2	3985	1985	1985	5985	5985	3985
t2.o3.m31/m32	32020	16020	16020	48020	48020	32020
t2.o3.at3	3995	1995	1995	5995	5995	3995
t2.o6.m11	32010	16010	16010	48010	48010	32010
t2.o6.at1	3985	1985	1985	5985	5985	3985
t2.o9.m31/m32	80020	40020	40020	120020	120020	80020
t3.o4.m31/m32	48020	96020	144020	48020	96020	144020
t3.o4.at3	1995	3995	5995	1995	3995	5995
t3.o7.m11	32010	64010	96010	32010	64010	96010
t3.o7.at1	1975	3975	5975	1975	3975	5975
t3.o10.m21	24030	48030	72030	24030	48030	72030

Casos política 4. Demanda básica * 1000

Operación	Mezcla					
	1	2	3	4	5	6
t1.o1.m11	75010	75010	60010	60010	45010	45010
t1.o1.at1	3725	3725	2975	2975	2225	2225
t1.o5.m21	45030	45030	36030	36030	27030	27030
t1.o5.at2	3735	3735	2985	2985	2235	2235
t1.o8.m31/m32	75020	75020	60020	60020	45020	45020
t2.o2.m21	36030	27030	27030	45030	45030	36030
t2.o2.at2	2985	2235	2235	3735	3735	2985
t2.o3.m31/m32	24020	18020	18020	30020	30020	24020
t2.o3.at3	2995	2245	2245	3745	3745	2995
t2.o6.m11	24010	18010	18010	30010	30010	24010
t2.o6.at1	2985	2235	2235	3735	3735	2985
t2.o9.m31/m32	60020	45020	45020	75020	75020	60020
t3.o4.m31/m32	54020	72020	90020	54020	72020	90020
t3.o4.at3	2245	2995	3745	2245	2995	3745
t3.o7.m11	36010	48010	60010	36010	48010	60010
t3.o7.at1	2225	2975	3725	2225	2975	3725
t3.o10.m21	27030	36030	45030	27030	36030	45030

Operación	Mezcla					
	7	8	9	10	11	12
t1.o1.m11	90010	90010	60010	60010	30010	30010
t1.o1.at1	4475	4475	2975	2975	1475	1475
t1.o5.m21	54030	54030	36030	36030	18030	18030
t1.o5.at2	4485	4485	2985	2985	1485	1485
t1.o8.m31/m32	90020	90020	60020	60020	30020	30020
t2.o2.m21	36030	18030	18030	54030	54030	36030
t2.o2.at2	2985	1485	1485	4485	4485	2985
t2.o3.m31/m32	24020	12020	12020	36020	36020	24020
t2.o3.at3	2995	1495	1495	4495	4495	2995
t2.o6.m11	24010	12010	12010	36010	36010	24010
t2.o6.at1	2985	1485	1485	4485	4485	2985
t2.o9.m31/m32	60020	30020	30020	90020	90020	60020
t3.o4.m31/m32	36020	72020	108020	36020	72020	108020
t3.o4.at3	1495	2995	4495	1495	2995	4495
t3.o7.m11	24010	48010	72010	24010	48010	72010
t3.o7.at1	1475	2975	4475	1475	2975	4475
t3.o10.m21	18030	36030	54030	18030	36030	54030

ANEXO E. REPORTE GENERADO POR GAMS

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	34	SINGLE EQUATIONS	428
BLOCKS OF VARIABLES	11	SINGLE VARIABLES	144
NON ZERO ELEMENTS	1,133	DISCRETE VARIABLES	55
GENERATION TIME	=	0.109 SECONDS	4 Mb WEX239-239
EXECUTION TIME	=	0.109 SECONDS	4 Mb WEX239-239

SOLVE SUMMARY

MODEL	tipo1	OBJECTIVE	t
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	344
SOLVER STATUS	1	Normal Completion	
MODEL STATUS	1	Optimal	
OBJECTIVE VALUE		604.2500	
RESOURCE USAGE, LIMIT	0.047	1000.000	
ITERATION COUNT, LIMIT	284	10000	

Este resumen indica que la ejecución del modelo se completó normalmente, que el valor obtenido para la variable respuesta es 604.25 y representa una solución óptima. Esta respuesta se generó a partir de 284 iteraciones.

--- VAR x Tiempo de inicio operación del sublote

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1.o1 .m11.1	.	. +INF	1.000
t1.o1 .m11.2	.	85.000 +INF	.
t1.o1 .m11.3	.	160.000 +INF	.

t1.o1 .m11.4	.	235.000	+INF	.
t1.o1 .at1.1	.	85.000	+INF	.
t1.o1 .at1.2	.	160.000	+INF	.
t1.o1 .at1.3	.	235.000	+INF	.
t1.o1 .at1.4	.	310.000	+INF	.
t1.o5 .m21.1	.	174.000	+INF	.
t1.o5 .m21.2	.	249.000	+INF	.
t1.o5 .m21.3	.	294.000	+INF	.
t1.o5 .m21.4	.	339.000	+INF	.
t1.o5 .at2.1	.	249.000	+INF	.
t1.o5 .at2.2	.	294.000	+INF	.
t1.o5 .at2.3	.	339.000	+INF	.
t1.o5 .at2.4	.	384.000	+INF	.
t1.o8 .m31.1	.	237.750	+INF	.
t1.o8 .m31.2	.	332.750	+INF	.
t1.o8 .m31.3	.	407.750	+INF	.
t1.o8 .m31.4	.	482.750	+INF	.
t1.o8 .m32.1	.	236.000	+INF	.
t1.o8 .m32.2	.	331.000	+INF	.
t1.o8 .m32.3	.	406.000	+INF	.
t1.o8 .m32.4	.	481.000	+INF	.
t2.o2 .m21.1	.	.	+INF	EPS
t2.o2 .m21.2	.	66.000	+INF	.
t2.o2 .m21.3	.	102.000	+INF	.
t2.o2 .m21.4	.	138.000	+INF	.
t2.o2 .at2.1	.	66.000	+INF	.
t2.o2 .at2.2	.	102.000	+INF	.
t2.o2 .at2.3	.	138.000	+INF	.
t2.o2 .at2.4	.	174.000	+INF	.
t2.o3 .m31.1	.	.	+INF	EPS
t2.o3 .m31.2	.	44.000	+INF	.
t2.o3 .m31.3	.	68.000	+INF	.
t2.o3 .m31.4	.	92.000	+INF	.
t2.o3 .m32.1	.	121.000	+INF	.
t2.o3 .m32.2	.	165.000	+INF	.
t2.o3 .m32.3	.	189.000	+INF	.
t2.o3 .m32.4	.	213.000	+INF	.
t2.o3 .at3.1	.	44.000	+INF	.
t2.o3 .at3.2	.	189.000	+INF	.
t2.o3 .at3.3	.	213.000	+INF	.
t2.o3 .at3.4	.	237.000	+INF	.
t2.o6 .m11.1	.	310.000	+INF	.
t2.o6 .m11.2	.	344.000	+INF	.
t2.o6 .m11.3	.	368.000	+INF	.
t2.o6 .m11.4	.	392.000	+INF	.

t2.o6 .at1.1	.	344.000	+INF	.
t2.o6 .at1.2	.	368.000	+INF	.
t2.o6 .at1.3	.	392.000	+INF	.
t2.o6 .at1.4	.	416.000	+INF	.
t2.o9 .m31.1	.	352.000	+INF	.
t2.o9 .m31.2	.	432.000	+INF	.
t2.o9 .m31.3	.	492.000	+INF	.
t2.o9 .m31.4	.	552.000	+INF	.
t2.o9 .m32.1	.	332.000	+INF	.
t2.o9 .m32.2	.	412.000	+INF	.
t2.o9 .m32.3	.	472.000	+INF	.
t2.o9 .m32.4	.	532.000	+INF	.
t3.o4 .m31.1	.	116.000	+INF	.
t3.o4 .m31.2	.	190.000	+INF	.
t3.o4 .m31.3	.	244.000	+INF	.
t3.o4 .m31.4	.	298.000	+INF	.
t3.o4 .m32.1	.	.	+INF	EPS
t3.o4 .m32.2	.	74.000	+INF	.
t3.o4 .m32.3	.	128.000	+INF	.
t3.o4 .m32.4	.	182.000	+INF	.
t3.o4 .at3.1	.	250.000	+INF	.
t3.o4 .at3.2	.	262.250	+INF	.
t3.o4 .at3.3	.	298.000	+INF	.
t3.o4 .at3.4	.	352.000	+INF	.
t3.o7 .m11.1	.	416.000	+INF	.
t3.o7 .m11.2	.	462.000	+INF	.
t3.o7 .m11.3	.	498.000	+INF	.
t3.o7 .m11.4	.	534.000	+INF	.
t3.o7 .at1.1	.	462.000	+INF	.
t3.o7 .at1.2	.	498.000	+INF	.
t3.o7 .at1.3	.	534.000	+INF	.
t3.o7 .at1.4	.	570.000	+INF	.
t3.o10.m21.1	.	466.250	+INF	.
t3.o10.m21.2	.	523.250	+INF	.
t3.o10.m21.3	.	550.250	+INF	.
t3.o10.m21.4	.	577.250	+INF	.

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR t	-INF	604.250	+INF	.
---- VAR tom	-INF	393.000	+INF	.
---- VAR tom1	-INF	116.500	+INF	.
---- VAR tom2	-INF	276.500	+INF	.
---- VAR tot	-INF	1448.750	+INF	.

--- VAR y

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
t1.o8.m31	.	1.000	1.000	EPS
t1.o8.m32	.	.	1.000	EPS
t2.o3.m31	.	1.000	1.000	EPS
t2.o3.m32	.	.	1.000	EPS
t2.o9.m31	.	.	1.000	EPS
t2.o9.m32	.	1.000	1.000	EPS
t3.o4.m31	.	.	1.000	EPS
t3.o4.m32	.	1.000	1.000	EPS

ANEXO F. RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE DESEMPEÑO

MAKESPAN

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		1	2	3	4	5	6
Básica	1	830,0	830,0	840,0	700,0	703,0	840,0
	2	635,0	677,0	684,5	632,5	605,0	648,5
	3	614,0	651,0	652,0	610,0	579,0	616,0
	4	604,3	638,0	635,8	598,8	566,0	599,8
Básica*100	1	81020	81020	81030	67525	66340	81030
	2	61520	64235	64985	60775	57035	61385
	3	57935	61635	61735	58525	54435	58135
	4	56960	60335	60110	57400	53135	56510
Básica*1000	1	810020	810020	810030	675025	663040	810030
	2	615020	642035	649535	607525	570035	613535
	3	579035	616035	617035	585025	544035	581035
	4	569285	603035	600785	573775	531035	564785

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		7	8	9	10	11	12
Básica	1	992,0	992,0	1.002,0	787,0	786,0	1.002,0
	2	758,0	758,0	732,0	706,0	634,0	732,0
	3	680,0	687,0	689,0	679,0	580,0	642,0
	4	652,0	674,0	669,5	665,5	553,0	597,5
Básica*100	1	97220	97220	97230	76225	75630	97230
	2	73820	73820	70230	68125	59440	70230
	3	66020	66020	65435	65425	54040	61230
	4	62725	63935	63485	64075	52075	56730
Básica*1000	1	972020	972020	972030	762025	756030	972030
	2	738020	738020	702030	681025	594040	702030
	3	660020	660020	654035	654025	540040	612030
	4	627025	639035	634535	640525	520525	567030

TIEMPO OCIOSO DE MÁQUINAS DE PROCESO

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		1	2	3	4	5	6
Básica	1	1296	1284	1324	788	800	1336
	2	516	672	702	518	408	570
	3	432	568	572	428	304	440
	4	393	516	507	383	252	375
Básica*100	1	141480	140280	140320	88700	83960	141520
	2	63480	73140	76140	61700	46740	62940
	3	49140	62740	63140	52700	36340	49940
	4	45240	57540	56640	48200	31140	43440
Básica*1000	1	1415880	1403880	1403920	887900	839960	1415920
	2	635880	731940	761940	617900	467940	629940
	3	491940	627940	631940	527900	363940	499940
	4	452940	575940	566940	482900	311940	434940

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		7	8	9	10	11	12
Básica	1	1944	1920	1960	1148	1144	1984
	2	1008	984	880	824	536	904
	3	696	700	708	716	320	544
	4	584	648	630	662	212	366
Básica*100	1	206280	203880	203920	124700	122320	206320
	2	112680	110280	95920	92300	57560	98320
	3	81480	79080	76740	81500	35960	62320
	4	68300	70740	68940	76100	28100	44320
Básica*1000	1	2063880	2039880	2039920	1247900	1223920	2063920
	2	1127880	1103880	959920	923900	575960	983920
	3	815880	791880	767940	815900	359960	623920
	4	683900	707940	689940	761900	281900	443920

TIEMPO OCIOSO DE AGENTES TRANSPORTADORES

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		1	2	3	4	5	6
Básica	1	2336	2339	2369	1943	1952	2366
	2	1681	1810	1832,5	1670,5	1588	1721,5
	3	1548	1662	1665	1533	1440	1554
	4	1448,75	1553	1546,25	1429,25	1331	1435,25
Básica*100	1	234590	234890	234920	193805	190250	234620
	2	176020	184465	186715	173485	162265	175615
	3	165195	176595	176895	166665	154395	165795
	4	162200	172625	171950	163220	150425	160850
Básica*1000	1	2345990	2348990	2349020	1938005	1902050	2346020
	2	1760920	1844965	1867465	1735435	1622965	1756465
	3	1652895	1766895	1769895	1667865	1544895	1658895
	4	1623575	1727825	1721075	1634045	1505825	1610075

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		7	8	9	10	11	12
Básica	1	2822	2828	2858	2201	2198	2852
	2	2050	2056	1978	1888	1672	1972
	3	1746	1773	1779	1737	1440	1632
	4	1592	1664	1650,5	1626,5	1289	1426,5
Básica*100	1	283190	283790	283820	219605	217820	283220
	2	212920	213520	202750	195235	169180	202150
	3	189450	190050	188295	187065	152910	175080
	4	179495	183725	182375	182945	146945	161510
Básica*1000	1	2831990	2837990	2838020	2196005	2178020	2832020
	2	2129920	2135920	2027950	1952935	1691980	2021950
	3	1895850	1901850	1883895	1871865	1529910	1751880
	4	1796795	1838825	1825325	1831295	1471295	1616810

CAPACIDAD OCIOSA DE MÁQUINAS DE PROCESO

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		1	2	3	4	5	6
Básica	1	0,3904	0,3867	0,3940	0,2814	0,2845	0,3976
	2	0,2031	0,2482	0,2564	0,2047	0,1686	0,2197
	3	0,1759	0,2181	0,2193	0,1754	0,1313	0,1786
	4	0,1626	0,2022	0,1994	0,1599	0,1113	0,1563
Básica*100	1	0,4366	0,4329	0,4329	0,3284	0,3164	0,4366
	2	0,2580	0,2847	0,2929	0,2538	0,2049	0,2563
	3	0,2120	0,2545	0,2557	0,2251	0,1669	0,2148
	4	0,1986	0,2384	0,2356	0,2099	0,1465	0,1922
Básica*1000	1	0,4370	0,4333	0,4333	0,3288	0,3167	0,4370
	2	0,2585	0,2850	0,2933	0,2543	0,2052	0,2567
	3	0,2124	0,2548	0,2560	0,2256	0,1672	0,2151
	4	0,1989	0,2388	0,2359	0,2104	0,1469	0,1925

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		7	8	9	10	11	12
Básica	1	0,4899	0,4839	0,4890	0,3647	0,3639	0,4950
	2	0,3325	0,3245	0,3005	0,2918	0,2114	0,3087
	3	0,2559	0,2547	0,2569	0,2636	0,1379	0,2118
	4	0,2239	0,2404	0,2353	0,2487	0,0958	0,1531
Básica*100	1	0,5304	0,5243	0,5243	0,4090	0,4043	0,5305
	2	0,3816	0,3735	0,3414	0,3387	0,2421	0,3500
	3	0,3085	0,2995	0,2932	0,3114	0,1664	0,2545
	4	0,2722	0,2766	0,2715	0,2969	0,1349	0,1953
Básica*1000	1	0,5308	0,5246	0,5247	0,4094	0,4047	0,5308
	2	0,3821	0,3739	0,3418	0,3392	0,2424	0,3504
	3	0,3090	0,2999	0,2935	0,3119	0,1666	0,2549
	4	0,2727	0,2770	0,2718	0,2974	0,1354	0,1957

CAPACIDAD OCIOSA DE AGENTES TRANSPORTADORES

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		1	2	3	4	5	6
Básica	1	0,9382	0,9394	0,9401	0,9252	0,9256	0,9389
	2	0,8824	0,8912	0,8924	0,8804	0,8749	0,8849
	3	0,8404	0,8510	0,8512	0,8377	0,8290	0,8409
	4	0,7992	0,8114	0,8107	0,7957	0,7839	0,7977
Básica*100	1	0,9652	0,9664	0,9664	0,9567	0,9559	0,9652
	2	0,9537	0,9572	0,9577	0,9515	0,9483	0,9536
	3	0,9505	0,9551	0,9551	0,9493	0,9454	0,9506
	4	0,9492	0,9537	0,9535	0,9479	0,9437	0,9488
Básica*1000	1	0,9654	0,9666	0,9666	0,9570	0,9562	0,9654
	2	0,9544	0,9579	0,9584	0,9522	0,9490	0,9543
	3	0,9515	0,9561	0,9561	0,9503	0,9466	0,9517
	4	0,9507	0,9551	0,9549	0,9493	0,9452	0,9503

Factor Demanda	Factor Política	Mezcla					
		7	8	9	10	11	12
Básica	1	0,9483	0,9503	0,9508	0,9322	0,9321	0,9488
	2	0,9015	0,9041	0,9007	0,8914	0,8791	0,8980
	3	0,8559	0,8603	0,8607	0,8527	0,8276	0,8474
	4	0,8139	0,8229	0,8218	0,8147	0,7770	0,7958
Básica*100	1	0,9710	0,9730	0,9730	0,9603	0,9600	0,9710
	2	0,9614	0,9641	0,9623	0,9553	0,9487	0,9595
	3	0,9565	0,9596	0,9592	0,9531	0,9432	0,9531
	4	0,9539	0,9579	0,9576	0,9517	0,9406	0,9490
Básica*1000	1	0,9712	0,9732	0,9732	0,9606	0,9603	0,9712
	2	0,9620	0,9647	0,9629	0,9559	0,9494	0,9600
	3	0,9575	0,9605	0,9601	0,9540	0,9443	0,9541
	4	0,9552	0,9592	0,9589	0,9530	0,9422	0,9505

ANEXO G. VERIFICACIÓN DE LOS SUPUESTOS DEL ANOVA

Supuesto de independencia de los datos

Este supuesto pretende asegurar que no existe influencia de mediciones anteriores sobre el resultado de otra medición. En este caso específico, los datos se obtienen a partir de un modelo de programación exacto, lo cual garantiza que el experimento realizado sobre cada una de las instancias es completamente independiente.

Supuesto de normalidad

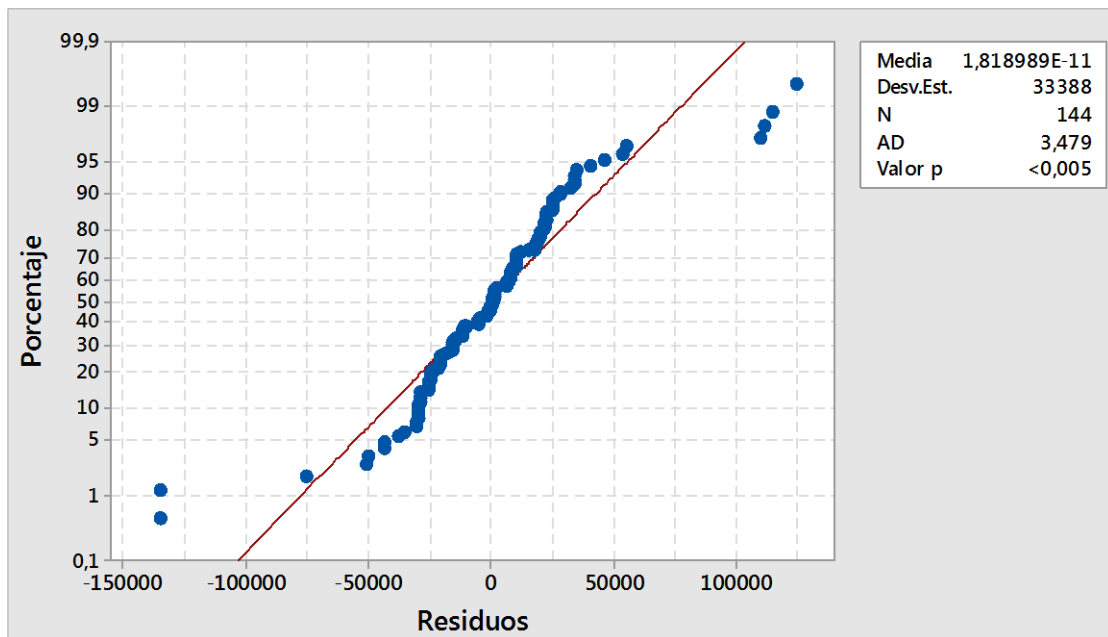
El supuesto de normalidad establece que los residuos dentro del modelo matemático que describe el diseño de experimentos, deben seguir una distribución normal con medio cero. Este supuesto puede verificarse por medio de la gráfica de probabilidad normal de los residuos, en la cual estos deben seguir el patrón de una línea recta, si su comportamiento es normal. Otra forma de comprobar la normalidad de los datos es por medio de pruebas analíticas como la de Anderson-Darling, en la cual las hipótesis a probar son:

H_0 : los residuos siguen una distribución normal

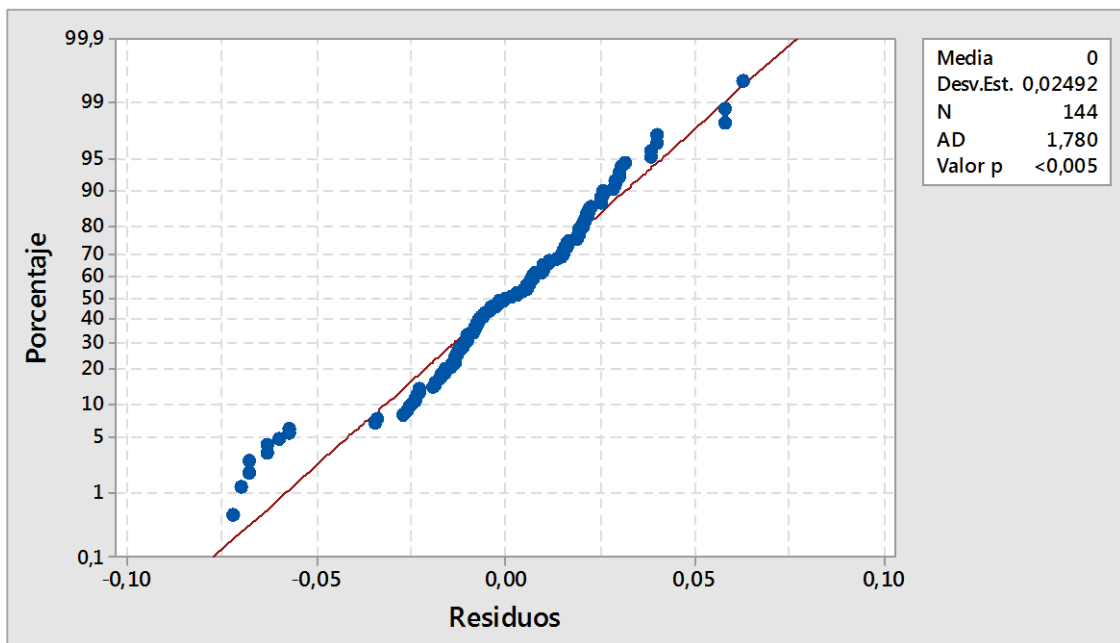
H_1 : los residuos no siguen una distribución normal

Si el valor p de la prueba es menor que el nivel de significancia $\alpha = 0,05$, entonces se rechaza H_0 y se concluye que los datos no siguen una distribución normal. A continuación se muestra la gráfica de probabilidad de los residuos para cada una de las tres variables. Adicionalmente, estas gráficas presentan los resultados de la prueba de Anderson-Darling.

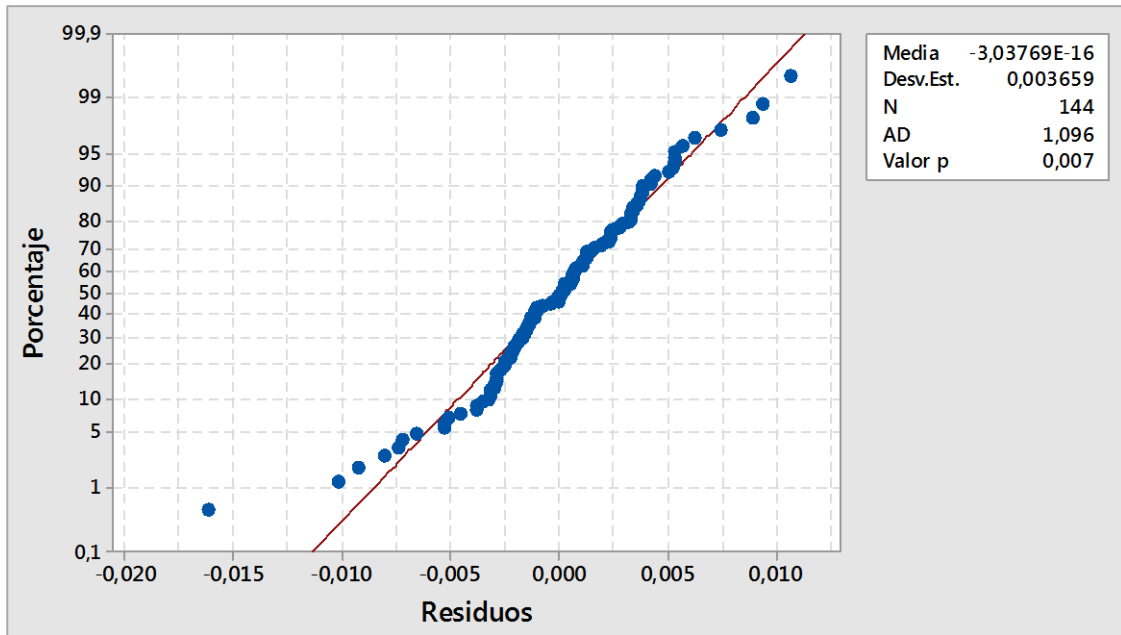
Prueba de normalidad de residuos para el makespan



Prueba de normalidad de residuos para la capacidad ociosa de máquinas de proceso



Prueba de normalidad de residuos para la capacidad ociosa de agentes transportadores



El valor p de la prueba, para las tres variables, es menor que el nivel $\alpha=0,05$ establecido, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos de las variables no siguen una distribución normal.

Supuesto de homocedasticidad

El supuesto de homocedasticidad establece que debe existir igualdad de varianza entre las poblaciones de cada tratamiento. El test de Levene es una prueba estadística que permite verificar el cumplimiento de este supuesto. Las hipótesis que se analizan con esta prueba son las siguientes:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$$

H₁: existe al menos una varianza diferente

A continuación se presentan los resultados de esta prueba para los datos del makespan, capacidad ociosa de máquinas de proceso y capacidad ociosa de agentes transportadores.

Test de Levene	Makespan	Capacidad ociosa de máquinas de proceso	Capacidad ociosa de agentes transportadores
Estadística de prueba	14,08	0,42	4,60
Valor p	0,000	0,945	0,000

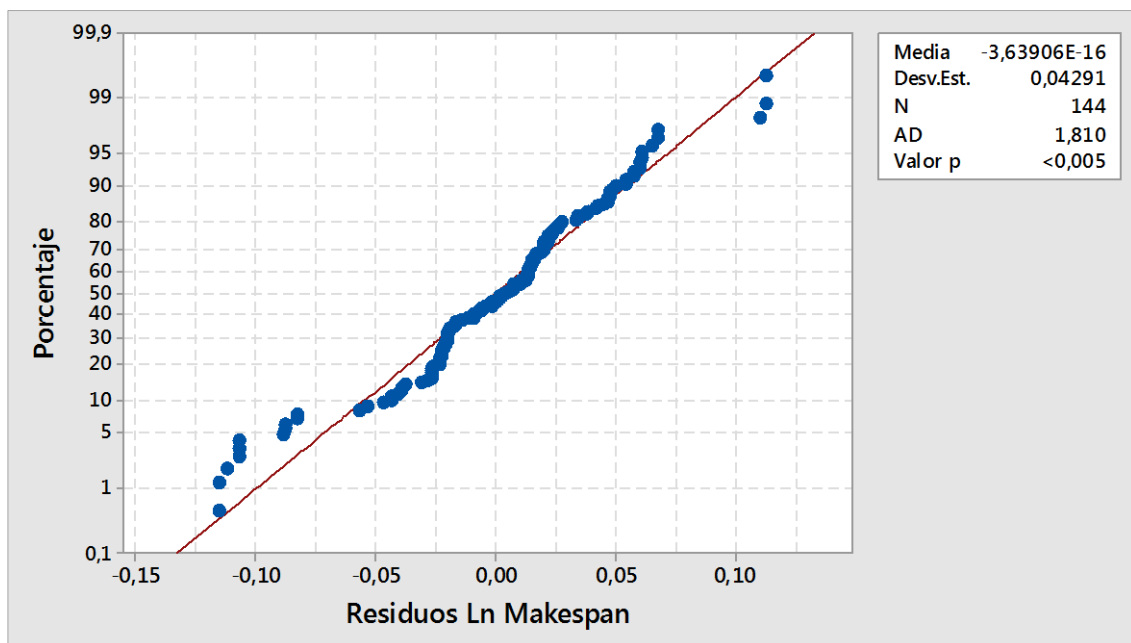
Los resultados del test de Levene para la capacidad ociosa de máquinas de proceso, muestran que el valor p para esta variable es mayor que el nivel de significancia $\alpha = 0,05$, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula y se infiere que se cumple el supuesto de homocedasticidad. No obstante, para el makespan y la capacidad ociosa de agentes transportadores, el valor p es menor que el nivel de significancia $\alpha = 0,05$, por lo cual se concluye que el supuesto de homocedasticidad no se cumple.

ANEXO H. TRANSFORMACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

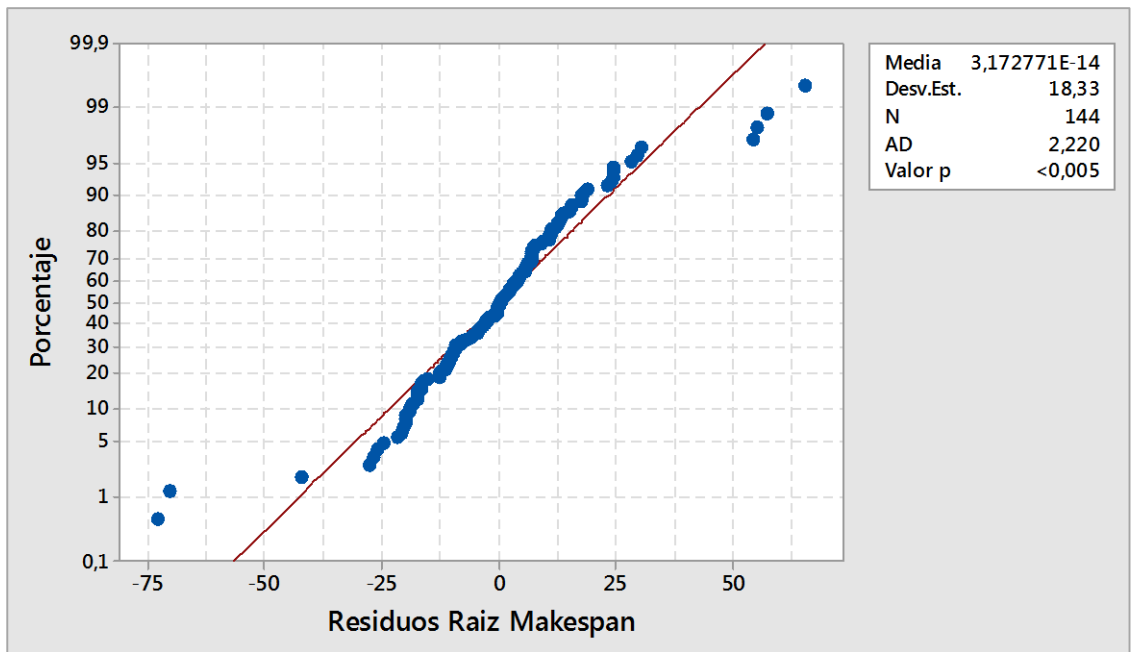
A continuación, se presenta la verificación del supuesto de normalidad de los datos transformados de las tres variables de desempeño. Los datos se modifican en Minitab, aplicando logaritmo natural, raíz cuadrada y transformación de Box Cox.

Cuando se obtiene un valor P menor al nivel de significancia establecido, se rechaza la hipótesis de que los datos se distribuyen normalmente. En todos los casos, se observa que las transformaciones no permiten la normalización de los datos, por lo que no representan una alternativa para realizar el análisis de varianza.

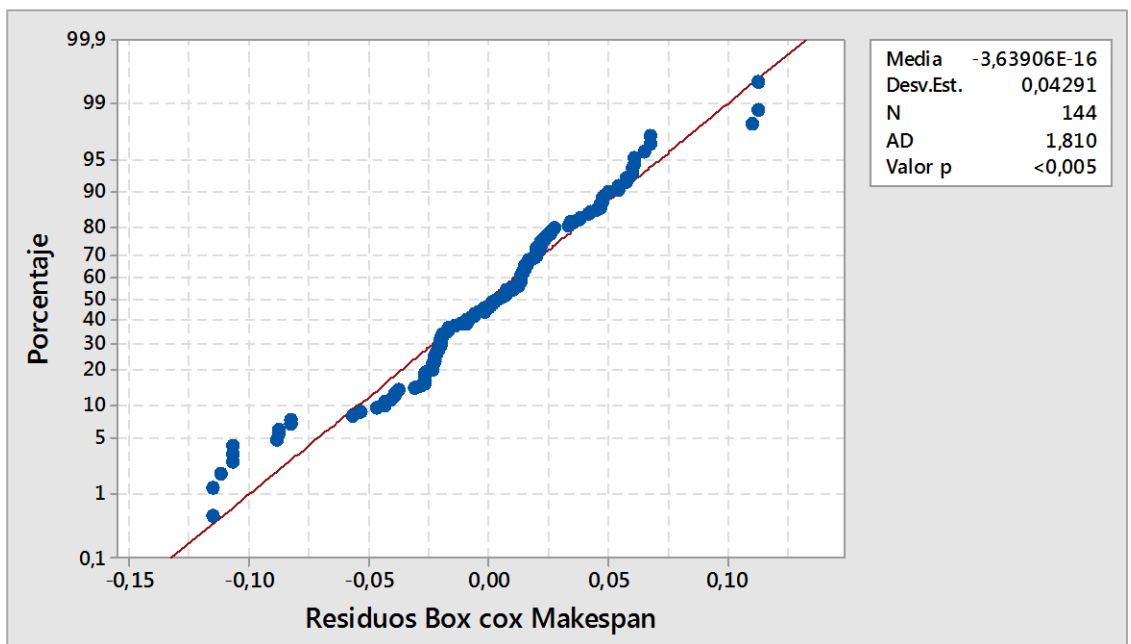
Prueba de normalidad de los residuos del makespan transformado con logaritmo natural.



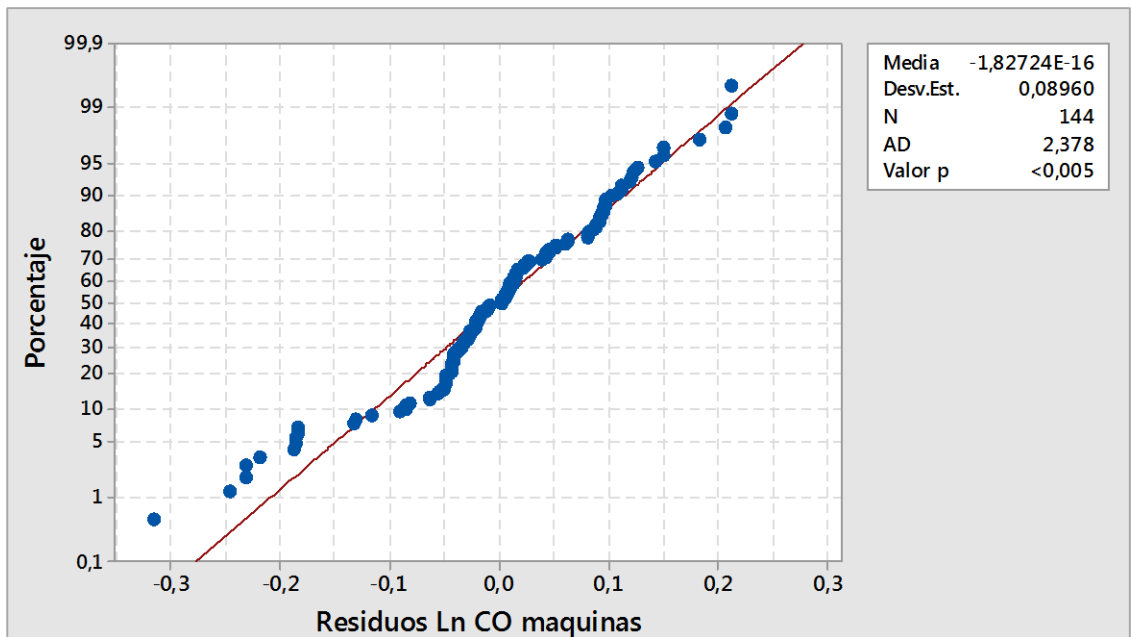
Prueba de normalidad de los residuos del makespan transformado con raíz cuadrada.



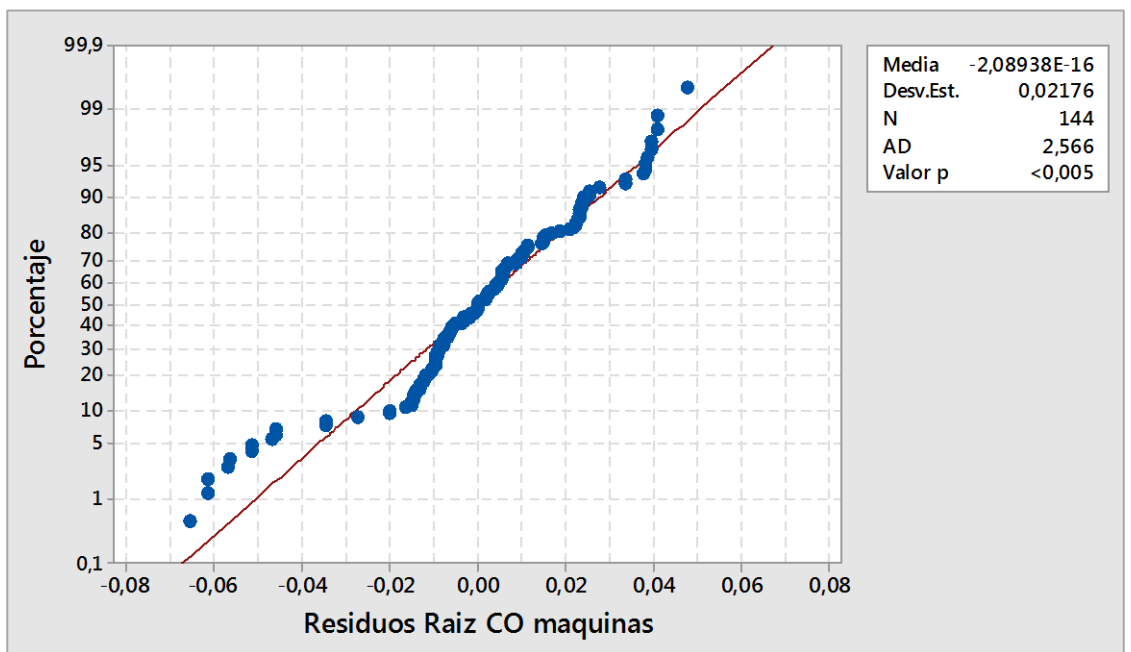
Prueba de normalidad de los residuos del makespan con la transformación de Box Cox (λ óptimo)



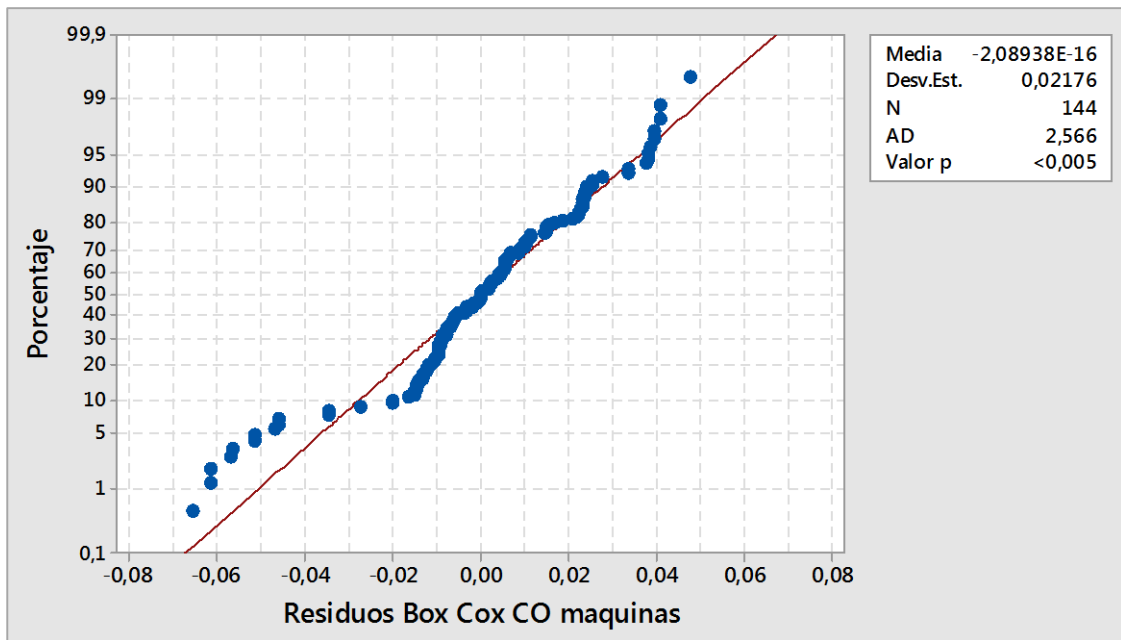
Prueba de normalidad de los residuos de la capacidad ociosa de máquinas, transformada con logaritmo natural.



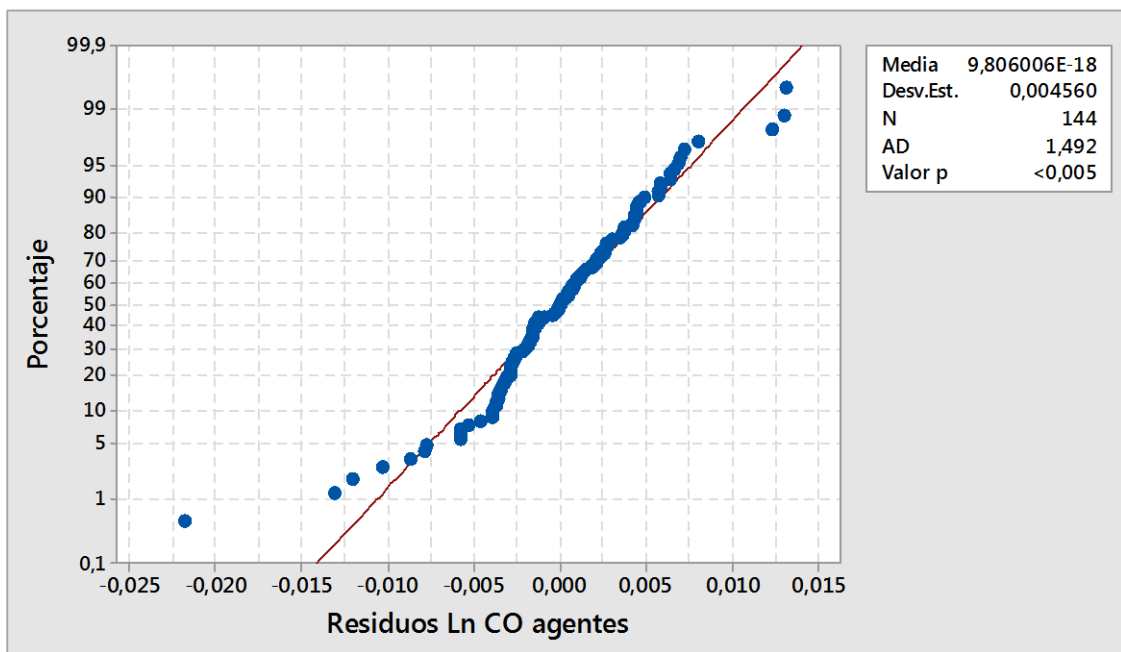
Prueba de normalidad de los residuos de la capacidad ociosa de máquinas, transformada con raíz cuadrada.



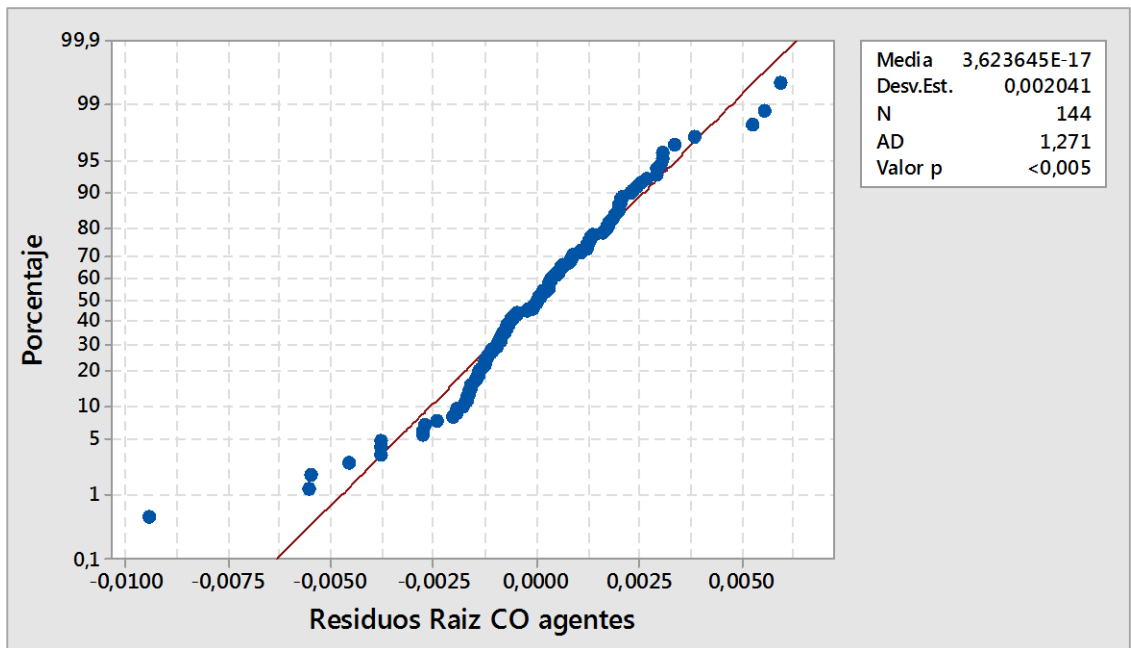
Prueba de normalidad de los residuos de la capacidad ociosa de máquinas, con la transformación de Box Cox (λ óptimo).



Prueba de normalidad de los residuos de la capacidad ociosa de agentes transportadores, transformada con logaritmo natural.



Prueba de normalidad de los residuos de la capacidad ociosa de agentes transportadores, transformada con raíz cuadrada.



Prueba de normalidad de los residuos de la capacidad ociosa de agentes transportadores, con la transformación de Box Cox (λ óptimo).

