

EVALUACION DEL IMPACTO DEL TAMAÑO DEL LOTE DE TRANSFERENCIA EN LA
PROGRAMACION DE OPERACIONES DE UN SISTEMA PRODUCTIVO DEL TIPO
FLOW-SHOP

KATHERINE CABALLERO MOYA

ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2006

EVALUACION DEL IMPACTO DEL TAMAÑO DEL LOTE DE TRANSFERENCIA EN LA
PROGRAMACION DE OPERACIONES DE UN SISTEMA PRODUCTIVO DEL TIPO
FLOW-SHOP

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA INDUSTRIAL

AUTORA:
KATHERINE CABALLERO MOYA

DIRECTORA:
MYRIAM LEONOR NIÑO LOPEZ
DOCTORA EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA

2006

*A mis padres, Rafael y Martha,
a mi hermano, Erich,
y a todos los que se alegren por mi.*

AGRADECIMIENTOS

A la profesora *Myriam Leonor Niño*, no sólo por darme la oportunidad de participar en esta investigación, sino también, por la constante asesoría y colaboración que hicieron posible la realización de este trabajo.

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL TAMAÑO DEL LOTE DE TRANSFERENCIA EN LA PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES DE UN SISTEMA PRODUCTIVO DEL TIPO FLOW-SHOP*

AUTORA: KATHERINE CABALLERO MOYA**

PALABRAS CLAVES: PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES, LOTE DE TRANSFERENCIA, LOTE DE PROCESO, FLOW-SHOP, MAKESPAN, FLOW TIME MEAN, PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto evalúa el impacto debido a la utilización de cuatro diferentes tamaños de lote de transferencia en la programación de operaciones de una configuración productiva del tipo flow-shop.

La configuración está diseñada para elaborar 8 productos, que son fabricados a través de 18 operaciones y que utilizan 4 clases de máquinas para su procesamiento. Los lotes de transferencia considerados en el trabajo son: igual al lote de proceso, con y sin setup, igual a la mitad del lote de proceso y una unidad.

Tomando como referencia un modelo de programación lineal entera mixta previamente formulado, se analiza el desempeño del sistema en términos de dos medidas de eficacia, el makespan y el flow time mean. Para cada una de las medidas se trabajan 56 casos de estudio generados a partir de 4 tamaños de lote de transferencia y 14 niveles de demanda, de esta forma se valora el comportamiento del tipo de lote de transferencia en distintos escenarios de utilización de recursos.

El análisis estadístico de la información obtenida, muestra un comportamiento similar de los cuatro tipos de lote de transferencia, en los diversos niveles de demanda, para los resultados de ambas medidas de eficacia; al mismo tiempo que las diferencias encontradas, entre las medias de los cuatro tamaños de lote de transferencia, son significativas. En todos los casos analizados, el lote igual a una unidad es el que está alcanzando los valores más pequeños para el makespan o el flow time mean; verificando así, que el flujo de las piezas se agiliza, en los sistemas de este tipo, cuando se transfieren pequeñas cantidades entre estaciones.

* Proyecto de grado

** Escuela de estudios industriales y empresariales – Dirigido por Myriam Leonor Niño López

SUMMARY

TITTLE: EVALUATION OF THE IMPACT OF THE TRANSFER BATCH SIZE ON THE SCHEDULING OF A FLOW-SHOP SYSTEM*

AUTHOR: KATHERINE CABALLERO MOYA. **

KEY WORDS: SCHEDULING, TRANSFER BATCH, PROCESS BATCH, FLOW-SHOP, MAKESPAN, FLOW TIME MEAN, MIX LINEAR INTEGER PROGRAMMING.

DESCRIPTION:

This project evaluates the impact because of the utilization of four different types of transfer batch on the scheduling of a flow-shop system.

The production system is designed to make 8 products that are made through 18 operations by the using of 4 classes of machines for its processing. The transfer batches considered in the work are: equal to the process batch, with and without setup, equal to a half of process batch and a unit.

Taking as reference a mix lineal integer programming model previously done, the performance of the system is analyzing in terms of the makespan and the flow time mean. For each one of the measures, the project works with 56 cases generated from 4 sizes of transfer batch and 14 demand levels, in this way the behavior of the transfer batch are studied in different boards of resources utilization.

Statistical analysis of the information obtained shows for both measures, a similar behavior of the four types of transfer batches on the different demand levels. At the same time, the differences founded between the means of the four sizes of transfer batches are significant. In all cases, the batch size of one unit is the one that are getting the smallest values for the makespan or the flow time mean; verifying that the flow of the pieces are accelerating, in this kind of productive systems, when small amounts are transferred between stations.

* Project for opting

** Escuela de estudios industriales y empresariales - Directed by Myriam Leonor Niño López

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	17
1 APROXIMACION A LA SITUACION PROBLEMÁTICA	19
1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.2 JUSTIFICACIÓN	21
1.3 OBJETIVOS	23
1.3.1 Objetivo General	23
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
2 FUNDAMENTACION TEORICA	25
2.1 PLANEACION Y CONTROL DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS.....	25
2.2 PROBLEMA DE LA PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES – SCHEDULING...	27
2.2.1 Patrones de flujo.....	32
2.2.2 Complejidad del problema de la programación de operaciones	34
2.2.3 Algoritmos de solución	36
2.2.4 Notación de los problemas de programación de operaciones	40
2.2.5 Programación de operaciones en una y dos máquinas.....	44
2.3 PROBLEMA DEL LOTEEO.....	47
2.3.1 Consideraciones importantes en el tema del loteo	50
2.3.2 Variabilidad.....	53
2.3.3 Justo a Tiempo – JIT	54
2.3.4 Teoría de Restricciones – TOC.....	59
2.4 APOYOS INFORMÁTICOS.....	61
2.4.1 Gams	62
2.4.2 Cplex	64
2.4.3 Gams/Cplex	65
3 ESTADO DEL ARTE.....	67
4 DISEÑO METODOLOGICO	73
4.1 TIPO DE ESTUDIO	73
4.1.1 Factores de investigación.....	74
4.2 BUSQUEDA DE INFORMACION BIBLIOGRAFICA	79

4.3	DEFINICION Y PARAMETRIZACION DEL MODELO	80
4.3.1	Descripción del Modelo General de Investigación	80
4.3.2	Modelización del problema del taller de trabajo por medio de la Programación Lineal Entera Mixta y en Gams/Cplex	86
4.3.3	Parametrización del modelo	87
4.4	PROCESAMIENTO Y SOLUCION DE CADA UNO DE LOS CASOS PLANTEADOS	96
4.5	RESULTADOS OBTENIDOS	96
5	PROCESO DE ANALISIS Y HALLAZGOS	105
5.1	ANALISIS ESTADISTICO DE LA MEDIDA DE EFICACIA <i>MAKESPAN</i>	105
5.1.1	Análisis descriptivo	105
5.1.2	Análisis de varianza	116
5.1.3	Contrastes sobre medias	134
5.2	ANALISIS ESTADISTICO DE LA MEDIDA DE EFICACIA <i>FLOW TIME MEAN</i>	143
5.2.1	Análisis descriptivo	143
5.2.2	Análisis de varianza	154
5.2.3	Contrastes sobre medias	170
5.3	EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE GAMS/CPLEX	175
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	184
6.1	CONCLUSIONES	184
6.2	RECOMENDACIONES	186
	BIBLIOGRAFIA	188
	ANEXOS	194

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de Planeación Jerárquica.....	28
Figura 2. Flujo de Información en un Sistema Productivo.....	31
Figura 3. Relación LT / LP = Igual (ejemplo).....	75
Figura 4. Relación LT / LP = Igual – <i>setup</i> (ejemplo).....	75
Figura 5. Relación LT / LP = Medio (ejemplo).....	76
Figura 6. Relación LT / LP = Unidad (ejemplo).....	76
Figura 7. Configuración Productiva.....	81
Figura 8. Relación LT / LP = Igual (O_1-O_3).....	92
Figura 9. Relación LT / LP = Igual – <i>setup</i> (O_1-O_3).....	92
Figura 10. Relación LT / LP = Medio (O_1-O_3).....	93
Figura 11. Relación LT / LP = Unidad (O_1-O_3).....	94
Figura 12. Relación LT / LP = Igual (O_6-O_{11}).....	94
Figura 13. Relación LT / LP = Igual – <i>setup</i> (O_6-O_{11}).....	95
Figura 14. Relación LT / LP = Medio (O_6-O_{11}).....	95
Figura 15. Relación LT / LP = Unidad (O_6-O_{11}).....	96
Figura 16. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica - <i>makespan</i>	107
Figura 17. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica - <i>makespan</i>	107
Figura 18. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica - <i>makespan</i>	108
Figura 19. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica - <i>makespan</i>	108
Figura 20. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica - <i>makespan</i>	109
Figura 21. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica - <i>makespan</i>	109
Figura 22. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica - <i>makespan</i>	110
Figura 23. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica X 10 - <i>makespan</i>	112
Figura 24. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica X 10 - <i>makespan</i>	112
Figura 25. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica X 10 – <i>makespan</i>	113
Figura 26. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica X 10 - <i>makespan</i>	113
Figura 27. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica X 10 - <i>makespan</i>	114
Figura 28. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica X 10 - <i>makespan</i>	114
Figura 29. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica X 10 - <i>makespan</i>	115
Figura 30. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 1.....	119

Figura 31. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 2.....	119
Figura 32. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 3.....	120
Figura 33. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 4.....	120
Figura 34. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 1 – Demanda Básica X 10	126
Figura 35. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 2 – Demanda Básica X 10	126
Figura 36. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 3 – Demanda Básica X 10	127
Figura 37. Gráfico de normalidad para el <i>makespan</i> en la Relación 4 – Demanda Básica X 10	127
Figura 38. Diagrama de caja para los valores del <i>makespan</i> en la demanda básica	132
Figura 39. Diagrama de caja para los valores del <i>makespan</i> en la demanda básica X 10	133
Figura 40. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica – <i>flow time mean</i>	145
Figura 41. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica – <i>flow time mean</i>	145
Figura 42. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica – <i>flow time mean</i>	146
Figura 43. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica – <i>flow time mean</i>	146
Figura 44. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica – <i>flow time mean</i>	147
Figura 45. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica – <i>flow time mean</i>	147
Figura 46. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica – <i>flow time mean</i>	148
Figura 47. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica X 10 – <i>flow time mean</i>	150
Figura 48. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica X 10 – <i>flow time mean</i>	150
Figura 49. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica X 10 – <i>flow time mean</i>	151
Figura 50. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica X 10 – <i>flow time mean</i>	151
Figura 51. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica X 10 – <i>flow time mean</i>	152
Figura 52. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica X 10 – <i>flow time mean</i>	152
Figura 53. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica X 10 – <i>flow time mean</i>	153
Figura 54. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 1 – Demanda Básica.....	156
Figura 55. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 2 – Demanda Básica.....	156

Figura 56. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 3 – Demanda	
Básica	157
Figura 57. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 4 – Demanda	
Básica	157
Figura 58. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 1 – Demanda	
Básica X 10	162
Figura 59. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 2 – Demanda	
Básica X 10	163
Figura 60. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 3 – Demanda	
Básica X 10	163
Figura 61. Gráfico de normalidad para el <i>flow time mean</i> en la Relación 4 – Demanda	
Básica X 10	164
Figura 62. Diagrama de caja para los valores del <i>flow time mean</i> en la demanda básica	
.....	168
Figura 63. Diagrama de caja para los valores del <i>flow time mean</i> en la demanda básica X	
10.....	169
Figura 64. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del <i>makespan</i> – Demanda	
Básica.....	181
Figura 65. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del <i>makespan</i> – Demanda	
Básica X 10	182
Figura 66. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del <i>flow time mean</i> – Demanda	
Básica.....	182
Figura 67. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del <i>flow time mean</i> – Demanda	
Básica X 10	183

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proceso de Planificación y Control de la Producción.....	27
Tabla 2. Características de los Procesos Productivos.....	32
Tabla 3. Reglas de secuenciación	46
Tabla 4. Ventajas de los tamaños de lote pequeños	58
Tabla 5. Estrategias para reducir los tiempos de preparación.....	58
Tabla 6. Demanda Básica para la investigación	78
Tabla 7. Demanda Básica X 10 para la investigación.....	78
Tabla 8. Factores de Investigación	78
Tabla 9. Nomenclatura de las tareas para la configuración productiva de estudio.....	82
Tabla 10. Nomenclatura de las operaciones para la configuración productiva de estudio	82
Tabla 11. Nomenclatura de las máquinas para la configuración productiva de estudio	83
Tabla 12. Parámetro: nombre del modelo.....	84
Tabla 13. Parámetro: medidas de eficacia.....	84
Tabla 14. Parámetro: relación LT / LP	85
Tabla 15. Parámetro nivel de demanda.....	86
Tabla 16. Parámetro P para el modelo	88
Tabla 17. Tareas correspondientes a cada operación.....	89
Tabla 18. Parámetro PL para las operaciones del nivel 1 de la demanda básica	90
Tabla 19. Definición del parámetro TT y TT ₂ en Gams/Cplex	91
Tabla 20. Variables para realizar los cálculos del Tiempo de Transferencia (ejemplo).....	91
Tabla 21. Resultados en Gams/Cplex para el <i>makespan</i>	98
Tabla 22. Resultados en Gams/Cplex para el <i>flow time mean</i>	100
Tabla 23. Resultados del <i>makespan</i> para los niveles de la Demanda Básica.....	101
Tabla 24. Resultados del <i>makespan</i> para los niveles de la Demanda Básica X 10	102
Tabla 25. Resultados del <i>flow time mean</i> para los niveles de la Demanda Básica	102
Tabla 26. Resultados del <i>flow time mean</i> para los niveles de la Demanda Básica X 10	102
Tabla 27. Uso de máquinas para el caso m3-1-1-01	104
Tabla 28. Tipo de Relación	105
Tabla 29. Estadísticos descriptivos para el <i>makespan</i> de la demanda básica.....	106
Tabla 30. Estadísticos descriptivos para el <i>makespan</i> de la demanda básica X 10.....	111

Tabla 31. Prueba de normalidad para el <i>makespan</i> de la demanda básica	118
Tabla 32. Prueba de homogeneidad de varianzas para el <i>makespan</i> de la demanda básica	121
Tabla 33. Anova para las medias del <i>makespan</i> de la demanda básica	122
Tabla 34. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del <i>makespan</i> de la demanda básica	122
Tabla 35. Subconjuntos homogéneos para las medias del <i>makespan</i> de la demanda básica	124
Tabla 36. Prueba de normalidad para el <i>makespan</i> de la demanda básica X 10.....	125
Tabla 37. Prueba de homogeneidad de varianzas para el <i>makespan</i> de la demanda básica X 10.....	128
Tabla 38. Anova para las medias del <i>makespan</i> de la demanda básica X 10.....	128
Tabla 39. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del <i>makespan</i> de la demanda básica X 10.....	129
Tabla 40. Subconjuntos homogéneos para las medias del <i>makespan</i> de la demanda básica X 10.....	131
Tabla 41. Comparaciones para la prueba de contraste de medias	135
Tabla 42. Resultados del <i>makespan</i> en la demanda básica.....	137
Tabla 43. Porcentajes de reducción del <i>makespan</i> en la demanda básica	137
Tabla 44. Resultados del <i>makespan</i> en la demanda básica X 10	137
Tabla 45. Porcentajes de reducción del <i>makespan</i> en la demanda básica X 10.....	138
Tabla 46. Estadísticos descriptivos de los porcentajes de reducción – <i>makespan</i>	138
Tabla 47. Prueba de contraste de medias para las reducciones del <i>makespan</i>	140
Tabla 48. Tipo de demanda recomendada para los cambios de lote de transferencia – <i>makespan</i>	143
Tabla 49. Estadísticos descriptivos para el <i>flow time mean</i> de la demanda básica	144
Tabla 50. Estadísticos descriptivos para el <i>flow time mean</i> de la demanda básica X 10	149
Tabla 51. Prueba de normalidad para el <i>flow time mean</i> de la demanda básica	155
Tabla 52. Prueba de homogeneidad de varianzas para el <i>flow time mean</i> de la demanda básica	158
Tabla 53. Anova para las medias del <i>flow time mean</i> de la demanda básica	158
Tabla 54. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del <i>flow time mean</i> de la demanda básica	159

Tabla 55. Subconjuntos homogéneos para las medias del <i>flow time mean</i> de la demanda básica	161
Tabla 56. Prueba de normalidad para el <i>flow time mean</i> de la demanda básica X 10	162
Tabla 57. Prueba de homogeneidad de varianzas para el <i>flow time mean</i> de la demanda básica X 10.....	164
Tabla 58. Anova para las medias del <i>flow time mean</i> de la demanda básica X 10	165
Tabla 59. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del <i>flow time mean</i> de la demanda básica X 10	165
Tabla 60. Subconjuntos homogéneos para las medias del <i>flow time mean</i> de la demanda básica X 10.....	167
Tabla 61. Resultados del <i>flow time mean</i> en la demanda básica	170
Tabla 62. Porcentajes de reducción del <i>flow time mean</i> en la demanda básica	171
Tabla 63. Resultados del <i>flow time mean</i> en la demanda básica X 10.....	171
Tabla 64. Porcentajes de reducción del <i>flow time mean</i> en la demanda básica X 10	171
Tabla 65. Estadísticos descriptivos de los porcentajes de reducción – <i>flow time mean</i> ..	172
Tabla 66. Prueba de contraste de medias para las reducciones del <i>flow time mean</i>	173
Tabla 67. Tipo de demanda recomendada para los cambios de lote de transferencia – <i>flow time mean</i>	175
Tabla 68. Tiempo de ejecución en Gams/Cplex para los casos del <i>makespan</i>	179
Tabla 69. Tiempo de ejecución en Gams/Cplex para los casos del <i>flow time mean</i>	180

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Modelización del problema del taller de trabajo por medio de la Programación Lineal Entera Mixta	190
Anexo B. Modelización del problema en Gams/Cplex	201
Anexo C. Parámetro PL para los casos de estudio	208
Anexo D. Parámetro TT y TT_2 para los casos de estudio	215
Anexo E. Asignación de turnos para el lanzamiento de los casos en Gams/Cplex	243
Anexo F. Resultados CPLEX para el modelo	246
Anexo G. Utilización de Máquinas para los casos de estudio	251

INTRODUCCION

El contexto empresarial actual obliga a las organizaciones a mejorar sus niveles de productividad constantemente, para de esta manera, garantizar la satisfacción de los clientes. Dentro de estos parámetros, la programación de operaciones se ha convertido en un área fundamental para desempeñar una eficiente función de producción.

Diseñar programas apropiados es una de las acciones de mayor incidencia para el buen desempeño de los sistemas productivos. Por lo tanto, evaluar estrategias encaminadas hacia este propósito se ha convertido en un tema de estudio importante, tanto para las empresas como para la comunidad académica; dentro de éstas se ubica la idea de trabajar diferentes tamaños para los lotes de proceso y de transferencia.

Esta investigación está orientada a evaluar el impacto que tiene en una configuración productiva, del tipo *flow shop*, el uso de cuatro tamaños de lote de transferencia en su programación de operaciones. Las conclusiones sobre el tema, permitirán identificar qué tipo de lote es más conveniente para el sistema cuando se busca minimizar dos medidas de eficacia, el *makespan* y el *flow time mean*.

El estudio se divide en 7 capítulos. En el Capítulo 1 se plantea el problema de investigación y se trazan los objetivos de la investigación. El Capítulo 2 presenta la fundamentación teórica sobre la programación de operaciones. Se abordan temas como el problema básico de la programación de operaciones, y dentro de éste el problema del loteo como foco de la investigación, además de considerar algunos aspectos importantes sobre el fraccionamiento de lotes. En el estado del arte, Capítulo 3, se reseña el desarrollo de estudios que han ahondado en el tema del loteo. La cuarta parte del documento expone el diseño metodológico de la investigación, aquí se hace referencia a la clase de estudio, al proceso de recolección de la información, a la metodología y el procedimiento que se siguió para su desarrollo. El Capítulo 5 presenta el proceso de análisis de la información encontrada en el apartado anterior, al mismo tiempo que expone los hallazgos encontrados con respecto al tema del loteo para la configuración

productiva analizada. En esta sección también se evalúa el desempeño de Gams/Cplex como herramienta informática de soporte para la solución de los modelos. El Capítulo 6 contiene las conclusiones y recomendaciones del estudio. En la parte final del documento se presentan los anexos que complementan este informe.

1 APROXIMACION A LA SITUACION PROBLEMÁTICA

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Si se tiene en cuenta que la gran mayoría de sectores industriales han alcanzado altos niveles de competencia, hoy en día la búsqueda de mayores niveles de eficiencia en los sistemas productivos se ha convertido en uno de los principales retos para los gerentes.

Para responder al requerimiento anterior, se han propuesto formas alternativas de funcionamiento en diversos ámbitos de la gestión del área de operaciones. Particularmente, en el campo de la programación de operaciones, se ha señalado el tema del loteo, como uno de los de mayor incidencia en el desempeño de los sistemas productivos.

La programación de operaciones es definida por Morton y Pentico¹ como “el proceso de organizar, elegir y dar tiempos al uso de recursos para llevar a cabo todas las actividades necesarias, para producir las salidas deseadas en los tiempos deseados, satisfaciendo a la vez un gran número de restricciones de tiempos y de relaciones entre actividades y los recursos”. El mejor programa que se diseñe está asociado con una medida de desempeño en particular, las cuales por lo general se dan en función de la variable tiempo.

La programación de operaciones alcanza su mayor nivel de complejidad en los sistemas del tipo Taller de Trabajo. Un taller de trabajo es una organización funcional cuyos centros se organizan alrededor de cierto tipo de equipos y operaciones, acá lo productos fluyen a través del sistema en lotes. En estos casos, generalmente hay que elaborar pequeños lotes de una gran diversidad de productos, donde éstos siguen secuencias de utilización de máquinas muchas veces diferentes; se caracteriza además, porque los trabajadores están capacitados para realizar varios trabajos, por el uso de equipos de propósito general, por el alto contenido de la mano de obra en los costos del proceso y porque la

¹ MORTON, T.W y PENTICO, D.W. Heuristic scheduling systems. NY : John Wiley & Sons, 1993.

mayoría de las veces el flujo del material a través del sistema es variable de un pedido a otro.

Una de las variaciones posibles al problema básico de la programación de operaciones es el uso de lotes de transferencia diferentes a los lotes de proceso. Por simplicidad, tradicionalmente en los sistemas productivos se han manejado tamaños iguales para estos dos tipos de lote. Sin embargo, enfoques como el Justo a Tiempo o la Teoría de Restricciones, proponen que lo ideal para ayudar a mantener un flujo sincronizado a lo largo de la línea de producción es que los lotes de transferencia sean lo más pequeños posible.

La búsqueda de soluciones al problema de la programación de operaciones en el taller de trabajo se ha realizado desde tres enfoques diferentes: los métodos exactos, los métodos heurísticos y la simulación.

Los métodos exactos buscan obtener soluciones óptimas en función de un criterio de evaluación determinado, dentro de estos métodos se encuentra la Programación Lineal Entera Mixta. Por otra parte, los métodos heurísticos son capaces de encontrar soluciones de buena calidad pero sin garantizar la optimalidad de la solución final; en ambos métodos se puede recurrir al uso de computadores para agilizar los cálculos necesarios. La simulación se refiere al diseño de experimentos, basados en un sistema real, que son desarrollados en un computador. Por lo tanto, mediante una representación sencilla, se analizan las características de un modelo productivo en particular; en este caso es necesario construir un modelo de simulación y ponerlo en funcionamiento para luego evaluar sus resultados.

Esta investigación busca evaluar el impacto que tiene la utilización de diferentes tamaños de lote de transferencia en la programación de operaciones de un sistema productivo. Se pretende analizar el desempeño del sistema a partir del uso de cuatro tipos de lote de transferencia, de tal forma que se valore su efecto en el tiempo de suministro.

Para su desarrollo se empleará como caso referente un taller del tipo *flow-shop*, tomando como medidas de eficacia el *Makespan* (instante de salida de la última pieza del taller) y

el *Flow-Time Mean* (tiempo medio de flujo). Esta configuración productiva corresponde a una de las cuatro configuraciones modeladas a través de la Programación Lineal Entera Mixta en la tesis doctoral "Evaluación del Sistema de Programación de Operaciones DBR"². Se trabajará con cuatro tipos de lote de transferencia: igual al lote de proceso, igual a la mitad del lote de proceso, igual a una unidad; tratando para la primera alternativa tiempos de preparación anticipados y no anticipados. Se utilizarán siete niveles de demanda básica y siete niveles de demanda básica aumentada, para un total de catorce niveles de demanda para cada uno de los ocho trabajos, lo que permitirá confrontar los resultados en distintos escenarios de utilización de recursos, y al mismo tiempo considerar el impacto de los tiempos de preparación en el tiempo total de procesamiento. Los valores para la demanda básica son generados de manera aleatoria en cada uno de los casos, mientras que la demanda básica aumentada es el resultado de la multiplicación por 10 de los valores iniciales. Por ejemplo, si en el nivel dos de la demanda básica para la tarea cinco hay que elaborar 8 piezas, las unidades a producir para esta tarea en el nivel dos de la demanda aumentada son 80.

Las diversas alternativas formuladas permitirán obtener en total una muestra de 112 casos posibles, para los cuales se realizarán los respectivos análisis estadísticos que permitan concluir sobre la efectividad de la reducción del tamaño de lote de transferencia en el desempeño del sistema productivo.

Cada uno de los casos, modelado como un problema de programación lineal entera mixta, será resuelto utilizando el Sistema General de Modelización Algebraica (GAMS).

1.2 JUSTIFICACIÓN

Como ingenieros industriales, es un deber darle a las empresas herramientas que les permitan llevar a cabo un proceso de toma de decisiones desde lo racional, y no únicamente desde la perspectiva empírica que han utilizado constantemente. Por lo tanto,

² NIÑO, Myriam Leonor. Evaluación del sistema de programación de operaciones DBR. Barcelona, 2002, 556 P. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Departamento de Organización de Empresas.

promover el uso de procedimientos fundamentados en las matemáticas aplicadas, debe ser una de las tareas que se emprenda a la mayor brevedad, si se desea contribuir en la búsqueda de la competitividad.

Hoy las empresas deben consolidar sus procesos mediante la implementación de acciones que las encaminen hacia la generación de mayores beneficios. En la medida que estas acciones estén fundamentadas en conceptos teóricos, validados a través de la práctica, se espera producir resultados superiores en la ejecución de sus actividades.

Se considera oportuno profundizar en el análisis del desempeño del sistema productivo, y de esta manera generar conclusiones que faciliten futuros desarrollos a nivel industrial. La academia debe ser un apoyo permanente en el mejoramiento de los sistemas reales, el conocimiento que de ella se desprenda no puede quedarse únicamente en el ámbito teórico. Es por ello que se hace necesario realizar estudios como el que se propone, con el fin de que a mediano plazo se puedan consolidar aplicaciones en sistemas productivos de la región.

En las empresas manufactureras son muchas las áreas estratégicas, dentro de la función de producción, que pueden mejorarse cuando se desea cumplir con los objetivos de la organización de forma competitiva. Para aumentar la productividad se puede trabajar en decisiones sobre las instalaciones, la capacidad, la tecnología del producto o del proceso, el aprovisionamiento, la organización del trabajo, el personal, la gestión y el control de la calidad, entre otras. Aquella que está relacionada con la programación de operaciones tiene un gran impacto en el mejoramiento del sistema productivo, eje fundamental de las organizaciones de este tipo. Por lo tanto, diseñar, validar y poner en marcha estrategias encaminadas a constituir programas más eficientes y eficaces debe ser un punto de análisis fundamental en los estudios actuales.

El caso particular de la programación de operaciones de interés para esta investigación, involucrando diferentes lotes de proceso y de transferencia, se estima que no ha sido suficientemente estudiado. Por otra parte, buena parte de las investigaciones en que se ha tratado este tema, el desempeño del sistema se ha evaluado bajo el criterio del costo y no en función del tiempo. Sin embargo, actualmente el tiempo se ha convertido en un

factor importante para evaluar el desempeño del sistema, en una variable de estudio fundamental dentro de todos los procesos empresariales, no solo los operativos sino también los de gerencia y de apoyo, ya que es uno de los parámetros que sirve para determinar los niveles de productividad de una organización. Además, en la medida que estos puedan disminuirse, los índices mejorarán y conducirán a las compañías a funcionar bajo estándares de eficiencia que les permitan destacarse dentro del mundo empresarial que hoy cuenta con elevados parámetros de competitividad; razones por las cuales se estima necesario ampliar la investigación existente en este campo.

Por otra parte, los nuevos lenguajes de programación permiten modelar configuraciones productivas complejas donde es posible representar la mayoría de las restricciones impuestas por el sistema. Por otra parte, la cuestión no se queda sólo en generar los modelos correspondientes a configuraciones planteadas teóricamente, hoy en día se dispone de equipos que son capaces de soportar el procesamiento de modelos matemáticos, como el que se trabaja en este estudio, para la solución de los problemas de programación de operaciones, que antes era imposible resolver con los sistemas informáticos disponibles.

Los resultados obtenidos en esta investigación serán de utilidad para en un futuro extrapolar sus conclusiones a casos prácticos del mundo industrial. Asimismo, para la comunidad académica que podrá contar con información cuantitativa en un área donde la investigación realizada es escasa.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el impacto que tiene para el desempeño de una configuración productiva del tipo *flow-shop*, la utilización de cuatro diferentes tamaños de lote de transferencia en su programación de operaciones.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar el modelo de Programación Lineal Entera Mixta para la configuración productiva, que fue definido previamente al desarrollo de la investigación
- Calcular los parámetros del modelo en los diferentes casos propuestos
- Solucionar los diversos casos utilizando los sistemas informáticos de apoyo GAMS/CPLEX
- Evaluar los resultados obtenidos en términos de calidad de respuesta y tiempo del sistema productivo
- Analizar la concordancia de los resultados obtenidos con los planteamientos teóricos existentes
- Evaluar el desempeño de los sistemas informáticos de GAMS/CPLEX con base en los criterios de capacidad, nivel de respuesta alcanzado y tiempo para su obtención

2 FUNDAMENTACION TEORICA

2.1 PLANEACION Y CONTROL DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

La planificación y el control de la producción, según Samuel Eilon³, son instrumentos que la dirección de una organización utiliza para coordinar las diversas actividades productivas y así encaminarlas hacia el cumplimiento del objetivo de máxima rentabilidad. Todo esto unido a la idea de organización dentro de las empresas, da como resultado el concepto de Gestión.

Por gestión se entiende, la dirección de las acciones que contribuyan a tomar decisiones orientadas a alcanzar los objetivos trazados y medir los resultados obtenidos, para finalmente, ubicar las acciones hacia la mejora permanente del sistema.

La importancia de una adecuada labor de planeación y control radica en que trae beneficios para las organizaciones en términos de calidad, costos, nivel de servicio, control en el inventario y en las operaciones en la planta.

A lo largo de la historia, los enfoques de la planeación han cambiado y hoy se trabaja con una orientación hacia la Planeación Jerárquica de la Producción. Este proceso de planeación está sustentado en una serie de decisiones interrelacionadas que deben tomarse al interior de la organización para marcar el camino a seguir y de esta manera fortalecer su posición en el mercado. No todos los individuos están encargados de tomar todas las decisiones, y no todas las decisiones se toman para los mismos horizontes de tiempo; existen distintos niveles administrativos y este enfoque de planeación define cuáles son las decisiones que le corresponden a cada uno.

En primer lugar, las que le corresponden a los altos niveles administrativos son las decisiones estratégicas. Estas de manera general marcan el rumbo de la organización, se fundamentan en la forma como la empresa desea llegar a los clientes y deben seguir los

³ EILON, Samuel. La Producción: planificación, organización y control. Barcelona: Labor S.A., 1976

lineamientos definidos por la estrategia corporativa, por lo tanto, son decisiones tomadas para horizontes de largo plazo. Definen, por ejemplo, los productos que se van a ofrecer, la estrategia de competencia adecuada para captar el mercado objetivo y lograr el posicionamiento, el sitio adecuado para ubicar la planta de producción, el nivel de capacidad con que trabajará la empresa.

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

Finalmente, el nivel administrativo bajo se encarga de las decisiones operacionales de planeación y control. Estas decisiones son de corto plazo y definen el programa final de operaciones adecuado para el cumplimiento de las metas que han sido precisadas en los niveles superiores. Aquí el trabajador sabe qué hacer en términos de cuáles productos y en qué secuencia se van a fabricar, en qué cantidades, qué máquinas le corresponden a cada uno y en qué momento se van a procesar.

La Tabla 1 resume los niveles de planificación y los planes que se obtienen al seguir el enfoque planteado por la Planeación Jerárquica de la Producción.

Según lo anterior, la programación de operaciones se ubica entre las decisiones operacionales de corto plazo. Esta programación determina cuáles son las operaciones que se van a realizar a lo largo del horizonte de planeación en cada uno de los centros de trabajo, bajo ciertas restricciones que el mismo sistema productivo impone.

En la Figura 1 se observa cómo el proceso de decisión, en la Planeación Jerárquica, finaliza con la determinación de los programas de producción.

La programación de operaciones está relacionada con la secuenciación (*sequencing*) y con la programación detallada (*scheduling*). En la primera, se decide el orden en que se

Tabla 1. Proceso de Planificación y Control de la Producción

	FASE	PLAN A OBTENER	ACTIVIDAD PRECISA
ESTRATÉGICA	Planificación a largo plazo	Plan de Producción a largo plazo	Planificación de capacidad a largo plazo
TÁCTICA	Planificación agregada o a mediano plazo	Plan agregado de producción	Plan agregado de capacidad
OPERATIVA	Programación maestra	Programa maestro de producción	Plan aproximado de capacidad
	Programación de componentes	Plan de materiales	Plan detallado de capacidad
	Gestión de talleres	Programación de operaciones	Control capacidad Control prioridades Acciones de compra

Fuente: DOMÍNGUEZ M, José A. Dirección de Operaciones: Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios. Madrid: Mc Graw Hill, 1995, P. 12.

ejecutan los trabajos en los diferentes centros de trabajo; mientras que en la segunda, se definen las fechas de inicio y terminación de las operaciones en cada uno de ellos.

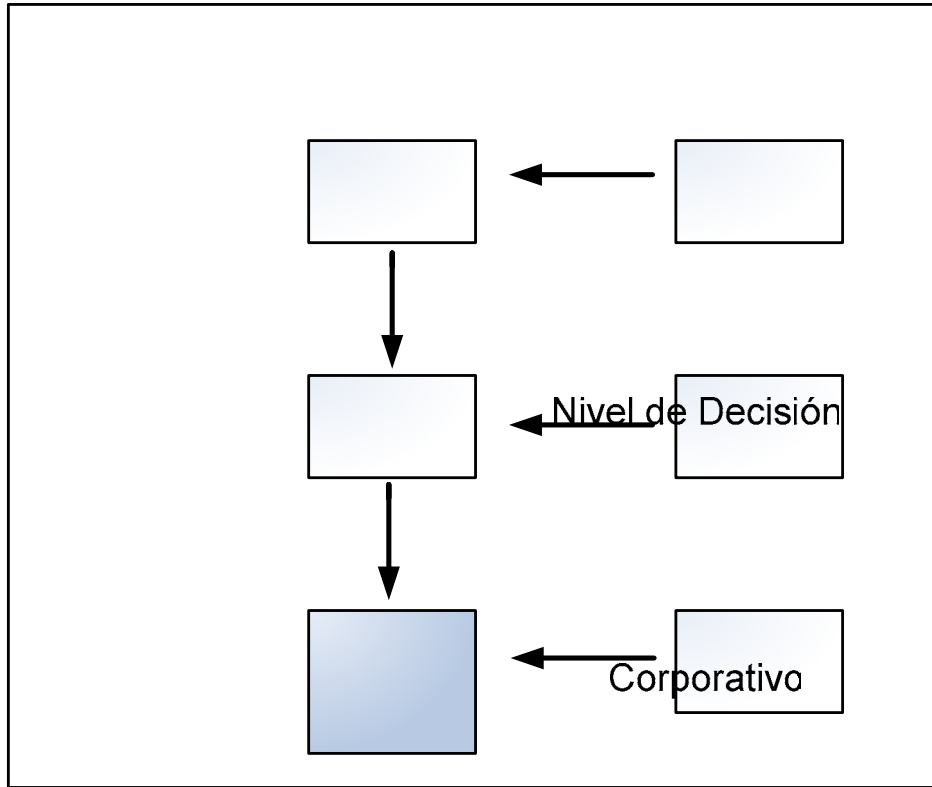
En este informe para referirse al término Programación Detallada de Operaciones se utilizará sencillamente Programación de Operaciones.

2.2 PROBLEMA DE LA PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES – SCHEDULING

Díez⁴ enuncia el problema de la programación de operaciones *como aquella que investiga una secuencia óptima, o en su defecto lo más próxima posible, para procesar n artículos*

⁴ DÍEZ, Enrique. Producción Industrial: modelos de secuencias. Sevilla : Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1982, P. 47

Figura 1. Proceso de Planeación Jerárquica



Proceso de

Distribución
producción
las plan

Fuente: CHASE, Richard; AQUILANO, Nicholas y JACOBS, Robert. Administración de Producción y Operaciones : Manufactura y Servicios. 8 ed. Bogotá: Mc Graw Hill Interamericana S.A, 2000, P. 552

en m máquinas, siendo el óptimo aquella secuencia que minimiza el tiempo total de ejecución. Por su parte, Companys y Corominas⁵ exponen que la idea es que n piezas (lotes, trabajos u órdenes) deben realizarse en m máquinas (secciones o puestos de trabajo). La realización de cada pieza consiste en someterla a una serie de operaciones prefijadas; cada operación está asignada a una máquina concreta y tiene una duración determinada conocida. Debe establecerse un programa, es decir, la secuencia de operaciones en cada máquina, que optimice un cierto índice de eficacia. En términos generales, la idea es optimizar alguna medida de eficacia relacionada con el desempeño del taller cuando se define el programa de las operaciones.

Gerente de Planta

Determina
estacional
de prod

Superintendente de
almacén

⁵ COMPANYS, Pascual y COROMINAS, Albert. Organización de la producción II: dirección de operaciones 4. Barcelona : Ediciones UPC, 1996, P. 24

Determina
programa
mensual
producción
artículo

El problema de la programación de operaciones es básicamente un problema de decisión; el cual se enfoca en la eficiente asignación de recursos a actividades a lo largo del tiempo⁶. Pinedo en su libro *Scheduling: theory, algorithms and systems*, habla sobre la característica de escasez que tienen los recursos en los sistemas productivos reales y aclara que la meta de este problema es buscar la optimización de uno o más objetivos.

Esta programación involucra el concepto de Taller de Trabajo. El cual está definido como una organización funcional en donde los centros de trabajo se organizan alrededor de cierto tipo de equipos y operaciones.

Algunos de los términos utilizados en la programación de operaciones son:

Trabajo o tarea	Es la unidad o unidades de producto que son procesadas en los diferentes recursos a lo largo del sistema.
Máquina	Es el recurso en el cual se lleva a cabo una actividad. Un centro de trabajo puede estar conformado por una o más máquinas.
Operación	La fabricación de cada trabajo está compuesta por una serie de operaciones o actividades. Cada una de ellas es el procesamiento que sufre un trabajo en una máquina particular.
Ruta	Es la sucesión de operaciones necesarias para la elaboración de un trabajo. La ruta define las relaciones de precedencia que deben seguirse y respetarse entre las operaciones para la fabricación de un trabajo.

⁶ CHEN, Bo., POTTS, Chris and WOEGINGER, Gerhard. A review of machine scheduling: complexity, algorithms and approximability. Recuperado el 3 de mayo de 2006 de <http://iwse.eng.ohio-state.edu/ISECourses/ise824/824%20Class%20Papers/SchedSurvey98ChenPottsWoeginger.pdf>

Los recursos, operaciones y trabajos pueden tomar diferentes formas dependiendo del sistema productivo en el que se encuentren.

Como se mencionó anteriormente, la programación de operaciones se encarga directamente de lo que sucede en el taller, sin embargo, no recibe información únicamente de él. Por el contrario, el proceso de programación está sustentado en la planeación a largo plazo que hace la organización; es decir, las decisiones que se toman en los altos mandos directivos afectan directamente la programación detallada.

La Figura 2 muestra cómo el flujo de información desde los niveles superiores enriquece el programa que se ejecuta en el taller.

El resultado de la programación de operaciones no es más que un plan de actividades proyectado sobre el tiempo. Algunos de los tiempos involucrados en la producción de los trabajos son:

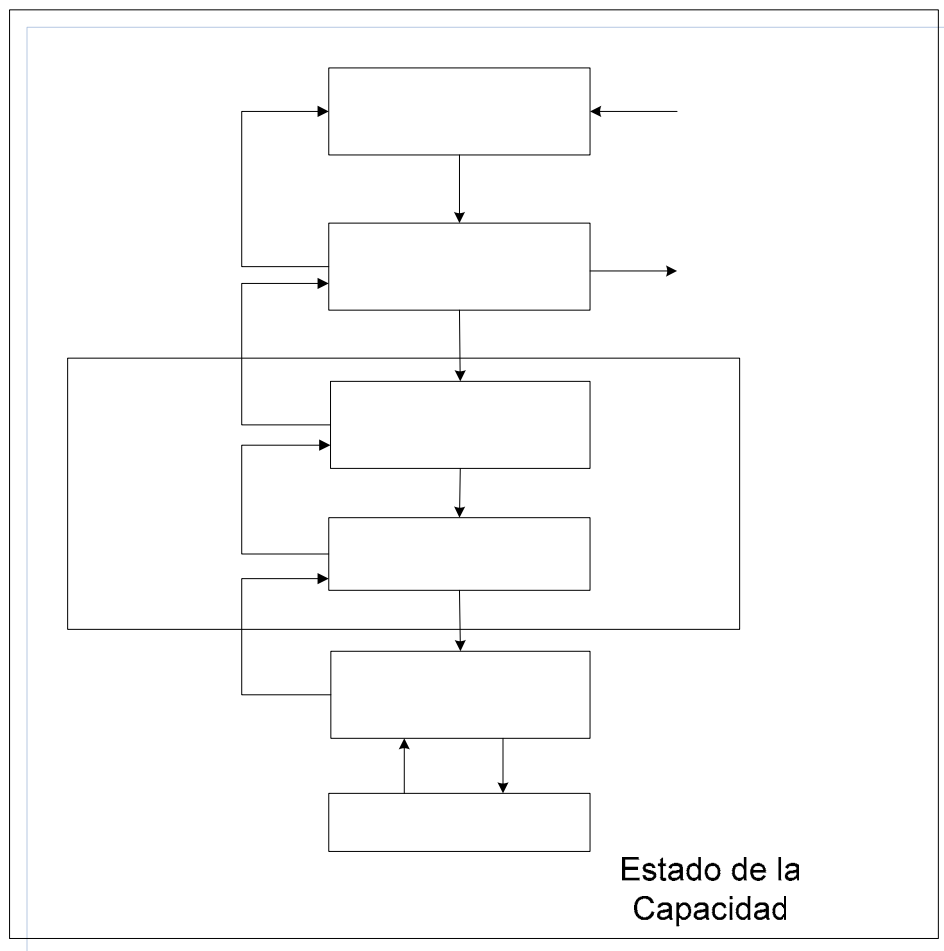
- Tiempo de confección del pedido
- Tiempo de transporte
- Tiempo de cola
- Tiempo de preparación
- Tiempo de ejecución: o tiempo de proceso
- Tiempo de espera
- Tiempo de inspección

La programación de operaciones no puede tratarse siempre de la misma manera, existen variaciones de acuerdo a los tipos de procesos; estos hacen que se modifiquen los conceptos y las aplicaciones al momento de generar programas. Así como existen procesos en línea, intermitentes o por proyectos, también varía la forma cómo se programan las operaciones dentro de ellos.

La Tabla 2 muestra las características de los procesos en línea, intermitentes y por proyecto.

En esta investigación se analiza la programación de operaciones en los talleres de trabajo o procesos intermitentes; que se caracterizan por tener flujos irregulares producidos por su configuración por máquinas o centros de trabajo⁷. Esto hace que la tarea de programar operaciones en este tipo de procesos se vuelva un poco compleja.

Figura 2. Flujo de Información en un Sistema Productivo.



Fuente: CHASE, R. Op. Cit., P. 5

Restricciones de la Programación

⁷ SCHROEDER, Roger. Administración de operaciones: toma de decisiones en la función de operaciones. 3 ed. México : Mc Graw Hill Interamericana de México S.A., 1992. P. 386

Tabla 2. Características de los Procesos Productivos

Características del Proceso			
Características	Línea	Intermitente	Proyecto
Producto			
Tipo de pedido	Lotes grandes, producción continua	Lote	Una sola unidad
Flujo del producto	En secuencia	Desordenado	Ninguno
Variedad del producto	Baja	Alta	Muy alta
Tipo de mercado	Masivo	Por cliente	Único
Volumen	Alto	Medio	Una sola unidad
Mano de Obra			
Habilidades	Bajas	Altas	Altas
Tipo de tarea	Repetitivas	No rutinarias	No rutinarias
Salario	Bajo	Alto	Alto
Capital			
Inversión	Alta	Media	Baja
Inventario	Bajo	Alto	Medio
Equipo	Propósitos especiales	Propósitos generales	Propósitos generales
Objetivos			
Flexibilidad	Baja	Media	Alta
Costo	Bajo	Medio	Alto
Calidad	Constante	Variable	Variable
Servicio	Alto	Medio	Bajo
Control y Planeación			
C. de producción	Fácil	Difícil	Difícil
C. de calidad	Fácil	Difícil	Difícil
C. de inventario	Fácil	Difícil	Difícil

Fuente: SCHROEDER, R. Op. Cit., P. 123

2.2.1 Patrones de flujo

Uno de los factores que sirve para describir y clasificar los problemas de programación de operaciones es el patrón de flujo que siguen los trabajos a lo largo del sistema.

Este patrón describe ciertas características sobre la forma como los trabajos recorren el sistema durante su proceso de fabricación. Los patrones de flujo mencionados por Pinedo⁸ son:

⁸ PINEDO, Michael. Scheduling : Theory, Algorithms and Systems. 2 ed. NJ : Prentice-Hall, 1995.

- *Job Shop*: en este caso las rutas de los trabajos están previamente definidas, es decir, cada trabajo utiliza los recursos en un orden determinado; pero estas rutas no son necesariamente iguales para cada uno de ellos.
- *Flow Shop*: los trabajos siguen una misma secuencia de uso de los recursos, es decir, la ruta de proceso que los guía indica que las operaciones de cada uno de ellos se hace siguiendo un mismo orden.
- *Open Shop*: a diferencia de los dos casos anteriores, en este tipo los trabajos no tienen una ruta definida. Cada uno de ellos puede fabricarse sin tener en cuenta el orden en que se utilicen los recursos, por lo que no existe ninguna restricción en este sentido. Por esto se dice que las rutas de los trabajos son abiertas y es el programador del taller el encargado de definir el programa.

Estas son las clasificaciones mas generales que se pueden hacer sobre los patrones de flujo que siguen los trabajos en un sistema productivo, sin embargo, no son las únicas. Existen algunas formas complementarias que se derivan de las anteriores, como por ejemplo, el *Flexible Flow Shop* o el *Permutation Flow Shop*. El primero hace referencia a aquellos sistemas en donde los recursos se encuentran ubicados en serie y en algunas estaciones hay máquinas en paralelo dentro de ellas; acá los trabajos se procesan en cada estación únicamente en un recurso. El *Permutation Flow Shop* establece que los trabajos deben fabricarse utilizando la misma secuencia de recursos y además en cada recurso los trabajos deben ser elaborados en el mismo orden.

A medida que se incluyen restricciones en la secuencia de flujo de los trabajos en el taller, aumenta la variedad de esta clasificación.

De los anteriores, los patrones de flujo que han recibido una mayor atención en el desarrollo de estudios académicos son los del tipo *Job Shop* y *Flow Shop*. En este caso, el desarrollo de la investigación se hará trabajando una configuración productiva del tipo *Flow Shop*.

2.2.2 Complejidad del problema de la programación de operaciones

La programación de operaciones se convierte en una actividad compleja a medida que aumenta el número de tareas y el número de máquinas, además los tiempos de proceso, la heterogeneidad de las piezas, el patrón de flujo de los trabajos y el tipo de industria son factores que hacen más difícil el desarrollo de estas actividades en los talleres.

Es por esto que se ha trabajado en técnicas programación de operaciones desde los años 40 y en las últimas décadas se han realizado estudios formales orientados a la solución del problema.

Al principio, los trabajos que se hicieron en este tema se enfocaban en proporcionar reglas para diseñar programas para algunos modelos productivos sencillos. El problema radicó en que en la realidad los modelos simples no son frecuentes; por el contrario, tienden a ser mucho más complicados. Sin embargo, estudiar modelos sencillos proporciona acercamientos que sirven para formular algoritmos que puedan resolver los problemas de programación de tareas en los sistemas de manufactura real.

El problema de la programación de operaciones se ha definido como un problema de optimización combinatoria. Este tipo de optimización hace parte de la Investigación de Operaciones y se encarga de encontrar la mejor solución en problemas discretos; aquellos en los que participan una cantidad finita de alternativas. Un ejemplo es el problema de la mochila, en el cual hay que escoger entre un conjunto de inversiones aquellas que son más rentables con una limitación máxima de presupuesto. Otros ejemplos son: el problema de transporte, selección de rutas, selección de proyectos, priorización.

Los problemas combinatorios son difíciles de resolver en la práctica y generalmente no se conocen algoritmos polinomiales para su solución. De acuerdo a esto, estos problemas se clasifican en los del tipo NP-duros, y por lo tanto, el tiempo para encontrar la solución crece con respecto al tamaño del problema de manera exponencial.

Básicamente los problemas de optimización se componen de⁹:

- Función objetivo: medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar.
- Variables: decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo.
- Restricciones: conjunto de relaciones que ciertas variables están obligadas a satisfacer.

Si se utilizan los anteriores conceptos, resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.

El conjunto anterior de función objetivo, variables y restricciones enmarca el concepto de modelo. Entendido este último como la representación matemática simplificada de una realidad compleja. Uno de las características más trascendentales que deben tener los modelos es la de equilibrar la necesidad de representar todos los detalles, con la factibilidad de encontrar técnicas de solución adecuadas. De nada sirve generar un modelo que contenga hasta los detalles más mínimos de la realidad que desea representar, si la complicación es tal, que no permite aplicar una técnica para su solución.

Cuando se estudia el problema de la programación de operaciones, las configuraciones que se analizan se representan mediante modelos matemáticos. Esto gracias a que poseen los componentes antes mencionados. Hay una función objetivo que se desea optimizar, que generalmente está en función de la variable tiempo. Se cuenta con una serie de variables que definen el inicio y terminación de los trabajos o que asignan los recursos a las distintas actividades. Y finalmente se trabaja con restricciones que determinan en qué forma se pueden procesar los trabajos en los distintos recursos, qué operaciones deben llevarse a cabo primero o qué máquinas pueden utilizarse en un momento dado.

⁹ LINARES, Pedro, et al. Modelos matemáticos de optimización. Recuperado el 20 de abril de 2006 de http://www.gams.com/docs/contributed/modelado_en_gams.pdf

2.2.3 Algoritmos de solución

Todo problema planteado requiere una solución; en el caso de la programación de operaciones, se ha trabajado con los métodos de solución propuestos por la investigación operacional. Entre estos se encuentran los métodos exactos, los métodos heurísticos y la simulación.

Métodos Exactos

Los primeros buscan soluciones a los problemas reales mediante el diseño de un modelo matemático mientras se optimiza un recurso. Dentro de la programación matemática se encuentra la programación lineal, la programación entera, la programación lineal entera mixta, la programación no lineal.

- **Programación Lineal – PL**

Dentro de los métodos exactos, la programación lineal ha recibido un amplio tratamiento y ha sido objeto de un sinnúmero de estudios. Es un instrumento que ayuda en la elección, que continuamente debe hacerse, entre diferentes alternativas; cuando no es posible escogerlas todas al mismo tiempo. El tipo de programación lineal más conocida es la aplicación que incluye el problema general de asignar recursos limitados entre actividades restrictivas, de la mejor forma posible.

En los problemas de programación lineal, como su nombre lo indica, todas las variables de estudio deben ser funciones lineales. Es decir, estudia la maximización o minimización de una función sujeta a desigualdades lineales.

- **Programación Lineal Entera Mixta - PLEM**

La Programación Lineal Entera Mixta tiene básicamente el mismo formato de los problemas de programación lineal pero considerando que algunas de las variables se restringen a números enteros. La descripción del problema también se hace mediante un modelo matemático. En el área de producción, este tipo de formulaciones matemáticas

han sido desarrollados para dar solución, entre otros, al problema de la programación de operaciones.

Debido a que en muchos ejercicios prácticos las variables sólo tienen sentido real si su valor es entero¹⁰, fue inevitable eliminar la limitación que generaba la suposición de divisibilidad¹¹ en los problemas lineales. Por ejemplo en los problemas de programación de operaciones hay que asignar recursos a los diferentes trabajos y esta asignación debe hacerse de manera completa; no puede asignarse una máquina y media a ciertos trabajos o no puede pretenderse que dos operarios y medio realicen ciertas actividades.

Obviamente los problemas de programación lineal entera mixta son más difíciles de resolver que los problemas de programación lineal. El primer algoritmo de solución fue formulado por Ralph Gomory en 1958¹².

Pinedo¹³ resalta que dentro de las distintas formas para manejar los problemas enteros, existen dos acercamientos importantes para la solución de este tipo de problemas: las técnicas de ramificación y acotación (representan la búsqueda en un árbol) y las técnicas de los planos de corte.

En la técnica de ramificación y acotación, también conocida como *branch and bound*, la ramificación hace referencia a la división del espacio de solución en subconjuntos; mientras que la acotación determina el valor de la mejor solución del subconjunto. Finalmente, si la cota indica que no puede contener la solución, la rama del árbol se poda. La técnica de los planos de corte utiliza el concepto de los “problemas relajados”, estos no son otra cosa que el mismo problema de estudio donde las variables enteras pueden tomar valores reales. Aquí se resuelve en cada iteración el problema original relajado

¹⁰ HILLIER, Frederick y LIEBRMAN, Gerarld. Investigación de operaciones. 7 ed. México : Mc Graw Hill Interamericana S.A., 2002. P. 7

¹¹ Dice que las variables de decisión pueden tomar valores no enteros

¹² Optimización lineal entra mixta. Recuperado el 20 de abril de 2006 de <http://departamentos.unican.es/macc/personal/profesores/castillo/Libro/Chap2.pdf>

¹³ Pinedo, M. Op. Cit.

incluyendo restricciones adicionales, una en cada iteración, que reducen la región factible sin excluir soluciones enteras¹⁴.

En la programación lineal entera mixta juegan un papel importante las variables binarias, ya que permiten modelar condiciones de asignación o condiciones lógicas. Los problemas de optimización combinatoria se pueden plantear como problemas enteros con variables binarias, asociando a cada alternativa una de estas variables. Si la alternativa es seleccionada, la variable toma el valor 1, de lo contrario, toma el valor 0; mientras se cumple con el objetivo de localizar una solución satisfactoria. Este tipo de variables son especial importancia en la formulación del modelo de la presente investigación.

Métodos Heurísticos

Los métodos heurísticos tratan problemas que son manejados de forma probabilística mediante una aproximación intuitiva, en esta los resultados no son exactos sino los mejores que pudieron obtenerse.

La aproximación heurística nace en el contexto que aunque algunos problemas son sencillos para resolver, como los problemas lineales, existen otros que son mucho más complicados. El interés por resolverlos, ya que hoy en día los problemas reales poseen un alto grado de complejidad y la importancia por obtener respuestas en tiempos relativamente pequeños, creó la necesidad de diseñar nuevos procedimientos que permitieran obtener buenas soluciones aunque no fueran óptimas. Por lo tanto, los métodos heurísticos son técnicas que se han desarrollado para resolver problemas de gran dificultad, como el problema de la programación de operaciones.

Los métodos metaheurísticos son métodos aproximados diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria. Su funcionamiento se basa en comenzar con una configuración conocida del sistema y luego aplicar una operación estándar de reasignar a todas las partes del sistema un turno hasta que se descubre una

¹⁴ El problema de la programación lineal entera mixta I. Recuperado el 20 de abril de 2006 de <http://departamentos.unican.es/macc/personal/profesores/castillo/Transparencias/Curso3.pdf>

configuración que mejore la función objetivo. Estas técnicas guían la construcción de soluciones o la búsqueda local en las distintas heurísticas.

Las metaheurísticas más aplicadas en la solución del problema de la programación de operaciones son los algoritmos genéticos, el recocido simulado y la búsqueda tabú; los tres hacen parte de los métodos de búsqueda local.

- **Algoritmos Genéticos**

Usan el mecanismo de selección natural para buscar, a través del espacio de decisión, soluciones óptimas, es decir, obedecen a una analogía con la evolución de las especies Darwiniana. En cada una de las etapas, se tiene una población de individuos y a partir de esta se genera una nueva población emulando la selección entre las especies, el cruzamiento y la mutación. Básicamente busca mejorar iterativamente un conjunto de soluciones factibles hasta obtener un conjunto de soluciones que pueda considerarse óptimo.

- **Recocido Simulado**

Se generó a partir de la analogía entre el fenómeno de enfriamiento de sustancias puras que se usa en metalurgia y un problema de optimización; ya que se considera el proceso de enfriamiento como un proceso de optimización cuyo objetivo es minimizar la energía del sistema. En este proceso, al principio las moléculas se encuentran en un estado caótico y a medida que disminuye la temperatura van alcanzando una configuración de mínima energía. En el proceso de recocido simulado, se sigue una regla para pasar de una configuración a otra y de esta manera recorrer el espacio de decisión.

- **Búsqueda Tabú**

Se basa en el principio de utilizar memoria de corto y largo plazo para recorrer un espacio, evadiendo de los óptimos locales. Partiendo de una solución actual, se pasa a la mejor solución de su entorno o vecindario. Posee una lista tabú donde se encuentran las soluciones que se han visitado previamente, esta lista actúa como la estructura de

memoria del algoritmo. Actualmente es la más utilizada en los problemas de programación de operaciones (*scheduling*).

La diferencia entre la técnica de recocido simulado y la de búsqueda tabú radica el criterio de aceptación y rechazo. Mientras que el recocido simulado utiliza un proceso probabilístico para la aceptación o el rechazo, la búsqueda tabú recurre a un proceso determinístico.¹⁵

Simulación

La simulación busca encontrar una solución particular utilizando una representación más sencilla de un proceso o fenómeno, es decir, se puede experimentar con sistemas que todavía no existen, o con sistemas que ya estén en funcionamiento sin necesidad de alterarlos. La solución del proceso de simulación sólo puede aplicarse al sistema que se está estudiando y no de forma generalizada a otros.

Mediante el diseño y desarrollo de un modelo computarizado, la simulación pretende entender y proponer hipótesis sobre el comportamiento del sistema real, evaluar distintas estrategias según las cuales un sistema pueda funcionar o predecir el comportamiento del sistema cuando se lleve a cabo su ejecución.

2.2.4 Notación de los problemas de programación de operaciones

Debido al gran número de trabajos que se han realizado en el campo de la programación detallada de operaciones, con el tiempo se ha desarrollado una notación particular que sirve para identificar los diversos casos que existen. Esta notación resume las características más importantes de los sistemas productivos que se estudian y ha apoyado la identificación rápida de los modelos, no sólo por parte de los investigadores, sino también por profesores y estudiantes.

¹⁵ LEE, Chung., LEI, Lei and PINEDO, Michael. Current trends in deterministic scheduling. Recuperado el 10 de mayo de 2006 de <http://www.ie.bilkent.edu.tr/~akturk/ie561/sch-lee.pdf>

Pinedo¹⁶ en su libro presenta una adaptación de la notación antes mencionada de la siguiente forma:

$$\alpha / \beta / \gamma$$

Acá se definen tres campos α , β y γ donde se ubican diferentes atributos que describen tres aspectos relacionados con la caracterización de un problema de programación de operaciones.

Campo α : describe el ambiente de la máquina dentro del sistema productivo. En él se ubica únicamente una entrada que varía entre las siguientes opciones:

- (1) Una máquina
- (P_m) Máquinas paralelas idénticas: hay m máquinas idénticas en paralelo. Los trabajos pueden ser procesados en cualquiera de las m máquinas.
- (Q_m) Máquinas en paralelo con diferentes velocidades: hay m máquinas en paralelo con diferentes velocidades v_i . La velocidad de las máquinas no depende del trabajo que estén procesando.
- (R_m) Máquinas en paralelo no-relacionadas: al igual que el caso anterior, las máquinas están en paralelo y tienen diferentes velocidades, pero ahora estas dependen del trabajo que están procesando.
- (F_m) *Flow Shop*: hay m máquinas idénticas en serie. Tal como se expuso anteriormente, todos los trabajos tienen la misma secuencia de uso de las máquinas, es decir, siguen la misma ruta. Una vez que un trabajo ha terminado de ser procesado en una máquina, sigue su camino y se une a la línea de espera de la máquina siguiente.
- (FF_c) *Flow Shop Flexible*: este es una generalización de los casos *flow shop* y máquinas en paralelo. Acá en lugar de existir m máquinas en serie, hay c etapas

¹⁶ PINEDO, M. Op. Cit., P. 14-19.

en serie, dentro de las cuales se ubican máquinas idénticas en paralelo. Un trabajo pasa de etapa en etapa y en cada una es procesado por una sola máquina, sin importar cuál sea.

- (J_m) *Job Shop*: Hay m máquinas ubicadas en el taller. Cada producto sigue su propia secuencia de uso de las máquinas.
- (FJ_c) *Job Shop Flexible*: al igual que el *Flow Shop Flexible*, este caso también es una generalización de otros dos; del *Job Shop* y del de máquinas en paralelo. Acá en lugar de m máquinas, hay c etapas dentro de las cuales hay dispuestas máquinas idénticas en paralelo. Cada trabajo pasa por las etapas de acuerdo a su propia secuencia; y dentro de ellas es procesado por una sola máquina, sin importar cuál sea.
- (O_m) *Open Shop*: hay m máquinas en el taller. Los trabajos no tienen una ruta definida. EL programador tiene libertad para definir las rutas de los trabajos.

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

- (r_j) Fecha de liberación: cuando aparece quiere decir que un el trabajo j no requiere iniciar su procesamiento antes de la fecha de liberación. De lo contrario, el trabajo puede comenzar a ser procesado en cualquier momento.
- (S_{jk}) Tiempos de preparación dependientes de la secuencia: muestra el tiempo de preparación por la dependencia de la secuencia entre los trabajos j y k . Cuando el tiempo de preparación entre los trabajos j y k dependen también de la máquina, se agrega el subíndice i . Cuando esta entrada no aparece, se asume que los tiempos de preparación son cero o independientes de la secuencia, en cuyo caso, sencillamente se suman al tiempo de procesamiento.

- (prmp) Interrupciones: se coloca en este campo cuando al programador se le permite interrumpir el procesamiento de un trabajo en cualquier momento para colocar un trabajo diferente en esa máquina.
- (prec) Restricciones de precedencia: aparecen cuando algún trabajo está sujeto a restricciones de precedencia, es decir, que para poder comenzar su procesamiento requiere que otro u otros hayan sido terminados antes.
- (brkdwn) *Breakdowns*: sucede cuando las máquinas no están continuamente disponibles. Generalmente estos periodos se fijan de manera anticipada.
- (M_j) Restricciones de elegibilidad de máquinas: cuando aparece, no todas las m máquinas son capaces de procesar un trabajo j . M_j denota el conjunto de máquinas que si pueden procesar el trabajo j . Generalmente aparece en los ambientes de m máquinas en paralelo.
- (prmu) Permutación: si está presente quiere decir que el orden en que se procesan los trabajos en la primera máquina debe mantenerse a través de todo el sistema.
- (block) Bloqueo: cuando existe un amortiguador entre dos máquinas consecutivas es posible que este se cargue completamente, en este caso, a la máquina anterior no se le permite liberar más trabajos; este fenómeno se conoce como bloqueo. Puede ocurrir en las configuraciones de tipo *Flow Shop*.
- (nwt) Sin espera: este fenómeno implica que un trabajo no puede detenerse entre dos máquinas consecutivas a lo largo del sistema. Para esto, el tiempo de inicio del proceso del trabajo debe ser retrasado hasta que pueda garantizarse que atravesará el sistema sin tener que esperar por alguna máquina.
- (recrc) Recirculación: sucede cuando a un trabajo se le permite visitar una máquina o un centro de trabajo más de una vez.

- $(p_j = p)$ Todos los tiempos de procesamiento son iguales.
- $(d_j = d)$ Todas las fechas comprometidas son iguales.

Campo γ : identifica el objetivo que debe ser minimizado (optimizado) en el problema de la programación de operaciones. Algunos de estos objetivos son:

- (C_{max}) *Makespan*: es el instante de salida de la última pieza del taller. Un *makespan* pequeño, generalmente implica una alta utilización de las máquinas.
- (F_{med}) *Flow Time Mean*: tiempo medio de permanencia en el taller o tiempo promedio de flujo.
- (L_{max}) Máximo retraso: mide la peor violación de las fechas comprometidas.
- $(\sum w_j C_j)$ Tiempo de terminación ponderado total: la suma de los tiempos de terminación ponderados dan una indicación del costo total incurrido por el programa.
- $(\sum w_j T_j)$ Retraso total ponderado: es una función de costo donde se penaliza el hecho de que un trabajo se termine después de su fecha programada.
- $(\sum w_j U_j)$ Número ponderado de trabajos tardíos.

2.2.5 Programación de operaciones en una y dos máquinas

El estudio de configuraciones productivas con una y dos máquinas ha permitido la formulación de reglas para la generación de programas de producción. Lo anterior está íntimamente relacionado con el concepto de secuenciación.

El objetivo básico de la secuenciación es la asignación eficiente de máquinas y otros recursos a los trabajos y la posterior determinación del orden en el cual cada uno de los trabajos debe ser procesado. Como el secuenciamiento genera un orden exacto de procesamiento de los trabajos, el inicio y finalización de las tareas queda claramente

definido, por lo tanto, en estos ambientes de máquinas la programación eficiente de las operaciones está determinada por las reglas de secuenciación que se implementen.

Domínguez¹⁷ menciona que la secuenciación de pedidos se puede realizar de dos formas; la primera, secuenciación en una sola máquina o instalación, y la segunda, secuenciación en varias máquinas; donde en cada una existen diferentes reglas para programar el orden de entrada de los diferentes pedidos.

Cuando se trabaja en una configuración con una máquina, se emplean reglas estáticas y dinámicas para fijar prioridades en la ejecución de las tareas y de esta forma llevar a cabo la programación de operaciones.

Las reglas más trabajadas en el secuenciamiento de tareas en sistemas productivos con una máquina se muestran en la siguiente Tabla 3. Dentro de éstas, sólo la Razón Crítica es considerada una regla dinámica, las demás, son reglas estáticas.

Para el caso de sistemas con varios recursos, se cuenta con la regla de Johnson para dos y tres máquinas, denominada después la regla de la mano izquierda-mano derecha. Esta es una de las reglas más conocidas y más empleadas en la solución de este tipo de problemas. Ordena una serie de trabajos teniendo como parámetro su tiempo de procesamiento. Su aplicación genera una secuencia que minimiza no sólo el tiempo de fabricación de todos los trabajos, sino también, el tiempo muerto de las máquinas.

Para el caso de dos máquinas, esta regla consta de los siguientes pasos:¹⁸

1. Registrar el tiempo de operación de cada tarea en cada una de las máquinas.
2. Escoger el tiempo de operación más corto.
3. Si el tiempo más corto es para la primera máquina, hacer la tarea primero; si es para la segunda, hacer la tarea de último.
4. Repetir los pasos 2 y 3 para cada tarea restante hasta completar el programa.

¹⁷ DOMÍNGUEZ, J. Op. Cit.

¹⁸ CHASE, R. Op. Cit., P. 688

Tabla 3. Reglas de secuenciación

REGLA	DESCRIPCION
MINPRT Minimum processing time / tiempo mínimo de procesamiento	Para esta regla, se selecciona la tarea que tiene el tiempo de procesamiento más corto en esa máquina. Esta regla se basa en la idea de que cuando se termina con rapidez un trabajo, otras máquinas más adelante recibirán el trabajo, dando como resultado una alta velocidad de flujo y una alta utilización.
MINSOP Minimum slack time per operation / tiempo mínimo de holgura por operación	La “holgura” se define como el tiempo que falta para la fecha de entrega menos el tiempo de procesamiento que hace falta para terminar el producto. Así, una tarea con un tiempo de holgura de cero tendría solo el tiempo suficiente para terminarse.
FCFS First come, first served / primero en llegar primero en ser atendido	La tarea que llega primero al centro de trabajo se procesa primero.
MINDS Minimum planned start date / fecha mínima planeada de inicio	En esta regla se utilizan los resultados del programa anterior para determinar la fecha de inicio planeada para cada tarea. La tarea que tenga la fecha de inicio planeada mínima se procesa primero.
MINDD Minimum due date / fecha de entrega mínima	Según esta regla, el trabajo que tiene la fecha de entrega más temprana es el que se procesa primero.
RANDOM Random selection / selección aleatoria	En esta regla se selecciona al azar la siguiente tarea a procesar. Esta regla por lo general no se usa en la práctica, se trata simplemente de una comparación con otras reglas.
RAZÓN CRITICA	<p>La razón crítica se calcula de la manera siguiente:</p> $CR = \frac{\text{tiempo que resta hasta la fecha de entrega}}{\text{tiempo de procesamiento que falta}}$ <p>Luego se programa el trabajo con el valor de (CR) más bajo. Con esta regla se calcula la relación del tiempo de la demanda hasta el tiempo de la oferta. Cuando la relación excede el valor de uno (1), se dispone de suficiente tiempo para terminar el trabajo. Si la relación es inferior a 1, el trabajo se va a retrasar a menos que puedan comprimirse los tiempos de procesamiento. Esta regla tiene un significado preciso; es decir; una razón igual a dos (2) significa que existe el doble del tiempo restante que el que implica el de procesamiento.</p>

Adaptado de: SCHROEDER, R. Op. Cit., P. 403-405.

Cuando se trabaja con tres máquinas, la regla de Johnson propone la creación de dos máquinas ficticias, M4 y M5, y es en ellas donde se realiza la programación de las operaciones de la misma forma como se trabaja para el caso de dos máquinas.

A las dos máquinas ficticias se les asignan los tiempos de los trabajos de la siguiente manera:¹⁹

- El tiempo del trabajo i en M4 será igual al tiempo de operación en la máquina uno más el tiempo en la máquina dos
- El tiempo del trabajo i en M5 será igual al tiempo de operación en la máquina dos más el tiempo en la máquina tres

2.3 PROBLEMA DEL LOTE O

Aunque comúnmente se han considerado iguales, en los sistemas productivos se trabaja con dos tipos de lotes: los de proceso y los de transferencia; si bien su diferencia ha sido pasada por alto en muchas empresas, en aquellas donde se ha aplicado este concepto, se ha convertido en una de las raíces para la mejora de los tiempos de ciclo de los productos.

Lote de Proceso

Lote de piezas procesadas en un centro de trabajo como resultado de una sola preparación de la máquina, es decir, es la cantidad de un producto que es trabajado en un recurso productivo antes de preparar ese recurso para fabricar un producto diferente.

El libro *Factory Physics*²⁰ presenta una subdivisión en los lotes de proceso. Define los lotes en serie y los lotes en paralelo. Los primeros son las piezas de un mismo trabajo que se procesan antes de que la estación de trabajo cambie para procesar otra familia de trabajos; su tamaño depende de la dimensión del

¹⁹ DOMÍNGUEZ, J. Op. Cit., P. 310.

²⁰ HOPP, Wallace. and SPEARMAN, Mark. *Factory Physics*. 2 ed. NY : Mc Graw Hill, 2001, P. 306

tiempo de preparación de la estación. Los lotes en paralelo son aquellas piezas que se producen simultáneamente en una estación de trabajo, por ejemplo, en un horno; su tamaño depende de la demanda de piezas que necesiten ser procesadas y de la capacidad de la estación.

Lote de Transferencia

Lote de productos o piezas que se mueven de un centro de trabajo a otro, es decir, es la cantidad de unidades que se mueven al mismo tiempo de un recurso al siguiente. También podría decirse que es el número de piezas que se acumulan antes de ser transferidas a la siguiente estación²¹. Teóricamente el tamaño óptimo para un lote de transferencia es uno.

De la manera como sean programados los lotes de proceso y los lotes de transferencia, dependerá el funcionamiento eficiente del sistema.

A continuación se muestran dos leyes que enunciaron Hopp y Spearman²² para el trato de los lotes de proceso y de transferencia:

Para los lotes de proceso

En estaciones con operaciones por lotes o con tiempos de preparación significativos:

- *El tamaño mínimo para el lote de proceso que origina un sistema estable puede ser más grande que uno.*
- *A medida que el tamaño del lote de proceso crece, el tiempo de ciclo se incrementa de manera proporcional con él.*
- *El tiempo de ciclo en una estación de trabajo puede ser minimizado para algunos tamaños de lote de proceso diferentes a uno.*

²¹ HOPP, W. Op. Cit., P. 306

²² Ibid., P. 306, 312.

Para los lotes de transferencia

Los tiempos de ciclo en un segmento de la ruta son proporcionales a los tamaños de lote de transferencia usados en ese segmento, siempre que no haya que esperar por los recursos encargados del transporte de las piezas.

La última parte de la ley anterior deja claro que si no hay capacidad suficiente para manejar los materiales, las reducciones en los tiempos de ciclo, cuando se trabaja con lotes de transferencia pequeños, serán opacadas por el tiempo que las piezas deban esperar para ser transportadas.

En los talleres que ejecutan una mala programación de operaciones, se ha visto cómo las piezas, en los talleres multiproducto, pasan más tiempo en filas de espera que siendo realmente procesadas. El interés en solucionar este problema, ha hecho que se utilice la diferencia entre los lotes de proceso y transferencia como una estrategia más en el mejoramiento de los sistemas productivos; como un enfoque que puesto en práctica trae beneficios en la reducción de los tiempos a lo largo del proceso, mejorando de esta manera la eficiencia de los sistemas.

La diferencia que se hace entre el lote de proceso y el lote de transferencia está vinculada de la técnica denominada *lot splitting* o fraccionamiento de lotes. Esta es una técnica que acelera el flujo de los trabajos en el taller mediante la división de los lotes de trabajo en sublotes.

En la práctica lo que se propone es dividir las grandes órdenes de producción en pequeños lote de transferencia apuntando a mover las partes más rápido a través del proceso productivo²³. Es decir, trabaja con lotes de proceso más grandes que los lotes de transferencia. En esta técnica no sólo se modifican los tamaños de lote de proceso y lote de transferencia, sino que también se puede variar el tamaño de los sublotes. Entonces el objetivo es determinar el número de sublotes para cada producto, el tamaño de cada

²³ RUBEN, R. and MAHMOODI, F. Lot splitting in unbalanced production systems. *En*: Decision Sciences. Vol. 29 (1998); P. 921-949. Recuperado el 7 de abril de 2006 de la base de datos ProQuest

sublote y la secuencia de procesamiento de ellos en cada máquina, mientras que un objetivo es optimizado²⁴.

Esta técnica mejora el comportamiento general del sistema al reducir los tiempos promedio de flujo y generar mejores fechas comprometidas. Básicamente reduce los tiempos de proceso y el inventario en proceso a medida que aumenta la tasa de utilización de las máquinas.

Cuando se lleva a cabo el fraccionamiento de lotes, en la práctica se realiza la superposición²⁵ de las operaciones consecutivas. Este traslape de operaciones puede darse gracias a que se marca la diferencia entre los lotes de proceso y los lotes de transferencia; ocurre cuando el alistamiento de la máquina siguiente puede hacerse mientras el lote que va a recibirse está siendo procesado en la máquina anterior. De esta manera las piezas que llegan al recurso no deben esperar a que se lleve a cabo el *setup* sino que se empieza a procesar inmediatamente. Este fenómeno es importante para el funcionamiento exitoso de esta técnica.

Según lo anterior las tareas de alistamiento de máquinas pueden dividirse en:

- *Attached setups*: el alistamiento de la máquina no puede empezar hasta que un sublote esté disponible (llegue) en la estación.
- *Detached setups*: el alistamiento es independiente de la disponibilidad de un sublote, puede realizarse sin la presencia de uno de ellos.
- Sin *setups*: el alistamiento no es necesario, sencillamente no ocurre.

2.3.1 Consideraciones importantes en el tema del loteo

Tiempos de Preparación

Benjaafar²⁶ resalta que no importa el tiempo de proceso ni los tiempos de preparación, los tamaños de lote de transferencia pequeños son beneficiosos para el sistema.

²⁴ FELDMANN, Martin and BISKUP, Dirk. On lot streaming with multiple products. Recuperado el 10 de mayo de 2006 de http://bieson.ub.uni-bielefeld.de/volltexte/2005/772/pdf/Diskussionspapier_542.pdf

²⁵ Sinónimo del verbo traslapar que significa cubrir una cosa a otra de un modo más o menos completo.

²⁶ BENJAAFAR, S. On production batches, transfer batches, and lead times. *En*: IIE Transactions. Vol 28 (1996); P. 357-362. Recuperado el 15 de diciembre de 2005 de la base de datos Hw Wilson

Por otra parte, no puede decirse lo mismo de los lotes de proceso. Cuando los *setup* son significativos, su tamaño óptimo no siempre será uno. Generalmente se ha buscado utilizar lotes de proceso grandes para así reducir la frecuencia de veces que es necesario realizar el alistamiento de una máquina. Sin embargo, un aumento considerable en su tamaño tampoco sería beneficioso ya que si se aumenta el tamaño del lote también se incrementa el tiempo de proceso del lote, que a final de cuentas generará tiempos de producción más largos.

Reducir los tiempos de preparación de máquinas tiene un mayor efecto en el desempeño del sistema que la disminución del tamaño de los lotes de transferencia²⁷. Esto se debe a que los tiempos de alistamiento cortos reducen los tiempos de procesamiento y los tiempos en las filas de espera, al tiempo que incrementan la capacidad del sistema. Por otra parte, la reducción en los tiempos de preparación disminuye el tamaño óptimo del lote de proceso, que si es adoptado, reduce el tiempo de flujo.

Según lo anterior, los esfuerzos iniciales deben examinar las acciones que hagan posible la reducción de los tiempos de preparación. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que se hagan, muchas veces esto no es posible; en las empresas hay restricciones de tecnología o de presupuesto que hacen que esta disminución no sea factible técnicamente. Por lo tanto, se cuenta con ambientes donde los *setup* son grandes y es en estos donde trabajar con lotes de transferencia pequeños y lotes de proceso grandes es beneficioso para la reducción de los tiempos de ciclo.

Filas de Espera

El análisis de las filas de espera en los sistemas de manufactura es importante puesto que durante el tiempo que una pieza está esperando, no se le agrega ningún tipo de valor al producto. Como se mencionó antes, muchas veces los productos pasan mas tiempo esperando antes de una estación que siendo procesados. Esto muestra claramente una deficiencia en la dirección del taller y es por esto que se buscan alternativas para reducir, y si es posible eliminar por completo, el tiempo producido por las filas de espera.

²⁷ Ibid., P. 359

Hay tres factores que marcan la aparición y el tamaño de estas filas: la variabilidad en los tiempos de proceso, la variabilidad en la llegada de los trabajos a la estación y la intensidad en el tráfico de productos que haya en la máquina.

Para controlar estos factores, se puede trabajar en los siguientes aspectos: los tiempos de lanzamiento de los lotes, la secuencia de trabajos en las máquinas, la capacidad de los centros de trabajo y los tamaños de lote.

La relación de los tamaños de lote con las filas de espera se debe a que afectan no sólo los tiempos de proceso sino también la intensidad del tráfico de productos en las estaciones. Por ejemplo, a medida que aumenta el tamaño de los lotes de proceso, se eleva el tiempo de ciclo y disminuye el tráfico de productos. Por otra parte, cuando se tienen lotes de transferencia pequeños, se disminuye el tiempo de ciclo pero aumenta el tráfico de productos en el taller. Luego de la forma como se definan los tamaños de lote dependerá la aparición de filas de espera en el taller.

Manejo de Materiales

No puede dejarse a un lado la consideración del manejo de materiales en la planta cuando se modifican los tamaños de lote. A medida que se trabaja con tamaños de lote de transferencia más pequeños, y se cuenta con un mayor número de máquinas, aumenta el manejo de materiales debido al incremento en la frecuencia de movimiento de piezas de una estación a otra.

Como deja claro la ley para lotes de transferencia que se mencionó antes, si se trabaja con lotes pequeños pero no se cuenta con la capacidad suficiente para trasladar de una estación a otra, y en el momento preciso, las piezas que están listas; el beneficio por trabajar con lotes pequeños no tendrá un impacto significativo en la reducción de los tiempos de ciclo.

En conclusión, cuando se implementen políticas para utilizar lotes de transferencia pequeños, hay que asegurarse primero que se cuenta con los recursos necesarios para llevar a cabo todas las actividades de transporte de piezas a lo largo del sistema.

2.3.2 Variabilidad

Los procesos en un sistema están sometidos a un alto grado de variabilidad. Según Hopp y Spearman²⁸, la variabilidad es toda característica de no uniformidad en una clase de sujetos. Para el caso de los talleres de trabajo esta no uniformidad aparece en el funcionamiento de los recursos, en los tiempos de proceso, en las características de las materias primas, en las preparaciones de máquina, en las medidas de calidad, etc.

Hay cierta variabilidad de la que puede encargarse el jefe del taller, así como existe otra que está fuera de su alcance. La primera está relacionada con los criterios de decisión, mientras que la segunda hace referencia a ciertos eventos que están fuera de su control inmediato. Aquí se pueden ubicar, por ejemplo, las fallas en las máquinas; generalmente es imposible saber cuándo un recurso no va a estar disponible a causa de un problema en su funcionamiento.

Obviamente el mejor funcionamiento de una planta aparece cuando la variabilidad es cero, es decir, cuando se tiene todo bajo control. Sin embargo, ésta no puede eliminarse completamente porque, como se dijo, hay factores que sencillamente no se pueden controlar a la perfección. Entonces se ha buscado trabajar en aquellos criterios de decisión que permiten reducir la variabilidad a lo largo de los procesos.

Entre estos criterios de decisión se encuentra la determinación de los tamaños de lote. El peor desempeño de un taller se da cuando los productos se mueven de una estación a otra en grandes cantidades. Esto se explica porque cuando el lote de transferencia es grande, la primera pieza que se termina de procesar en una estación debe esperar mucho tiempo hasta que se complete el lote, mientras que la última pieza que es procesada no está sometida a esta espera. De esta forma los tiempos de espera, en relación al tiempo necesario para formar el lote de transferencia, son más variables que cuando se desplaza una sola pieza a la vez.

De acuerdo a esto, trabajar con lotes de proceso diferentes a los lotes de transferencia, y establecer tamaños pequeños para los últimos, es una forma como puede reducirse la

²⁸ HOPP, W. Op. Cit., P. 249

variabilidad en los sistemas productivos y por lo tanto, se constituye en una razón más para indagar el tema de la programación de operaciones trabajando distintos tamaños de lote.

2.3.3 Justo a Tiempo – JIT

Es bien conocido el significado de JIT como aquella filosofía de producción que implica la mejora continua, sin embargo abarca mucho más. Sus inicios se ubican en la empresa Toyota donde producto de la necesidad de fabricar una gran variedad de automóviles en pequeños volúmenes y con el mismo proceso, se creó y puso en marcha un nuevo sistema de producción.

El JIT es una filosofía de manufactura basada en una eliminación planeada de todo el desperdicio y un continuo mejoramiento de la productividad²⁹, viendo el desperdicio como cualquier cosa que no agregue valor al producto. El JIT trata de definir la manera en que debería gestionarse el sistema de producción de una organización.

Render y Heizer³⁰ establecen que el JIT como filosofía busca apoyar la producción esbelta. Esta entendida como la producción que da al cliente lo que quiere, cuando lo quiere y sin desperdicios. Por lo tanto busca producir la parte correcta, en el sitio correcto, en el momento correcto.

El sistema Justo a Tiempo busca atacar los problemas fundamentales, eliminar los desperdicios, buscar la simplicidad y diseñar sistemas eficaces de identificación de problemas. Para esto se fundamenta en la generación de ideas innovadoras por parte del personal (Soifuku), el autocontrol de los defectos por parte de los propios procesos productivos (Jidoka) y la flexibilidad en el trabajo (Shojinka).

La flexibilidad se refiere a la adecuación del sistema productivo a las variaciones de la demanda; se requiere para que las organizaciones puedan adaptarse a la incertidumbre

²⁹ Just in Time Production. Recuperado el 17 de mayo de 2006 de <http://personal.ashland.edu/~rjacobs/m503jit.html>

³⁰ HEIZER, Jay y RENDER, Barry. Principios de administración de operaciones. 5 ed. México : Prentice Hall, 2004.

originada por la variabilidad, y por lo tanto, respondan efectivamente a las circunstancias cambiantes que hoy caracterizan los ambientes productivos.

Entender esta filosofía es de especial interés para el desarrollo de esta investigación ya que uno de sus principios, la reducción en el tamaño de lote, marca un punto de partida para el estudio.

Elementos Clave del Justo a Tiempo

- Estabilizar y nivelar el Programa Maestro de Producción con la carga uniforme de la planta: la idea es crear una carga uniforme a través de todos los centros de trabajo. Conocer las fluctuaciones de la demanda de los productos terminados.
- Reducir o eliminar los tiempos de preparación: el propósito debe ser llegar a trabajar con tiempos de preparación de un solo dígito, es decir, de menos de diez minutos. Esto puede lograrse con un mejor planeación, con el rediseño de procesos o con el rediseño de producto; todo apoyado en el trabajo coordinado en equipo.
- Reducir los tiempos de entrega: el JIT propone la conexión directa con las líneas de montaje. Además, para disminuir los tiempos de espera, se plantea la importancia de la estandarización de las operaciones. Los centros de trabajo deben ubicarse más cerca, aplicar la tecnología de grupos para la fabricación de piezas que sirvan para varios productos, reducir el tamaño de las filas y aumentar la cooperación entre procesos consecutivos.
- Mantenimiento preventivo: implementar los programas de mantenimiento preventivo en los tiempos en que las máquinas y los operarios están desocupados.
- Fuerza de trabajo flexible: los operarios deben ser entrenados para manejar diferentes máquinas, para realizar tareas de mantenimiento e inspecciones de calidad.

- Certeza en la calidad de los suministros e implementación de un programa de calidad de cero defectos: los trabajadores deben ser responsables por la calidad del trabajo que realizan y poseer la autoridad suficiente para detener un proceso cuando algo se está haciendo mal. Acá es básica la relación de confianza que pueda mantenerse con los proveedores.
- Distribuciones flexibles: se deben diseñar distribuciones de planta que permitan la disminución de los movimientos de personas y materiales y que puedan acomodarse cuando los cambios en los procesos de algún producto lo requieran.
- Kankan: en japonés significa “etiqueta de instrucción”. Es el sistema de información entre estaciones que propone JIT. Gobierna y controla el flujo de los materiales en la planta, ya que avisa sobre lo que se va a producir, en qué cantidad, mediante qué medios y cómo y en qué cantidades debe ser transportado. Se caracteriza por ser simple, rápido y fiable. Tiene como funciones el control de la producción y la mejora de procesos.
- Reducir los tamaños de lote: de procesamiento y de compra. Para manejar los primeros es necesario reducir los *setups*, para los segundos la cooperación con los proveedores es imprescindible. La clave del JIT es fabricar un buen producto en lotes pequeños.

El Interés del Justo a Tiempo en el Tamaño de Lote

El desperdicio en los procesos aparece por la variabilidad³¹ que existe en ellos. A mayor variabilidad, mayor será el desperdicio, ya que toda desviación será producto de una actividad o acción que no esté agregando valor.

La eliminación del desperdicio que busca JIT está sustentada en mantener un flujo sincronizado de materiales y productos a lo largo del sistema. Esta producción en flujo

³¹ Toda desviación de un proceso óptimo

debe garantizar que ni la materia prima, ni el inventario de producto en proceso, ni los componentes, ni los productos terminados se estanquen en algún punto del sistema.

Para alcanzar este objetivo se debe llevar a cabo un movimiento constante de materiales de acuerdo con la demanda, hay que eliminar las alteraciones y desórdenes en la manufactura y finalmente es necesario reducir la cantidad de inventario en proceso y eliminar las existencias de producto terminado.

Algunas de las alternativas para disminuir el nivel de inventario son: usar un sistema de halar para mover los productos, desarrollar sistemas de entrega JIT con los proveedores, entregar las piezas y materiales directamente en el punto de uso, cumplir la programación diseñada, reducir los *setups*, usar tecnología de grupos y finalmente reducir el tamaño de lote.

Cuando se trabajan lotes pequeños, el flujo entre estaciones será más rápido y de esta manera se reducirán los inventarios en proceso del sistema. Es por esto que el JIT propone trabajar con tamaños de lote pequeños: a medida que se reduce el inventario se tiene un flujo más sincronizado y así se cumple con el proceso de eliminación del desperdicio.

Otras ventajas de los tamaños de lote pequeños que establece el JIT se muestran en la Tabla 4.

Sin embargo para que el flujo de materiales en lotes pequeños funcione es necesario que se mejore el manejo de materiales y que se reduzcan los tiempos de preparación. De lo contrario, la estrategia de trabajar con pequeños lotes no funcionará adecuadamente.

La Tabla 5 resume algunas estrategias para reducir los *setups*.

Tabla 4. Ventajas de los tamaños de lote pequeños

Ventajas de los tamaños de lote pequeños	
1. Mejoras en costos debido a	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Incremento del rendimiento de los activos en existencias ▪ Incremento del rendimiento de la base de activos totales ▪ Reducción de la exposición a reelaboración ▪ Necesidad de menores volúmenes para alcanzar el punto de equilibrio
2. Mejoras en los niveles de calidad mediante	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor rapidez en la realimentación sobre problemas de calidad ▪ Aceleración en la introducción de cambios técnicos
3. Aumentos en la agilidad en las entregas debido a	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción de los plazos de fabricación ▪ Aumento de la frecuencia de acceso al equipo ▪ Aumento de la flexibilidad de la composición de productos

Fuente: LEFCOVICH, Mauricio. Just in Time: en la búsqueda de la ventaja competitiva. Recuperado el 18 de mayo de 2006 de <http://72.14.207.104/search?q=cache:SejYyk1GZOkJ:www.ilustrados.com/publicaciones/EEpAAypZpFXMYNCwja.php+%22just+in+time%22+%2B+lotes&hl=es&gl=co&ct=clnk&cd=6>

Tabla 5. Estrategias para reducir los tiempos de preparación

Estrategias para reducir los tiempos de preparación
<ol style="list-style-type: none"> 1. Dividir la preparación en preparativos y la preparación en si, hacer la mayor parte posible mientras la máquina / proceso está en operación 2. Acercar el material 3. Estandarizar y mejorar el uso de herramientas 4. Usar un sistema de un solo toque para eliminar ajustes 5. Capacitar a los operarios y estandarizar los procedimientos de trabajo 6. Repetir el ciclo

Fuente: HEIZER, J. Op. Cit., P. 604

2.3.4 Teoría de Restricciones – TOC

La meta de toda organización es ganar dinero, es lo que propone la Teoría de Restricciones³². En este sentido, las actividades deben estar orientadas hacia este propósito. Sin embargo, todo sistema posee restricciones ya que de lo contrario, las empresas ganarían dinero de forma ilimitada. Pero la efectividad de estas actividades depende del sitio del sistema donde sean implementadas.

Uno de los principios fundamentales que propone la TOC es que el rendimiento de cualquier cadena siempre está determinado por su eslabón más débil³³. Por lo tanto lo que se busca es aumentar la fuerza que tenga este eslabón para realizar sus actividades; si se mejora el rendimiento del eslabón más débil, se estará mejorando el rendimiento de todo el sistema.

La TOC define una serie de pasos que garantizan la mejora continua y que al mismo tiempo alinean las acciones con la meta de la empresa.

1. Identificar las restricciones del sistema
2. Decidir cómo explotar las restricciones
3. Subordinar todo a las decisiones adoptadas en el paso anterior
4. Elevar la restricción
5. Si en los pasos previos se ha roto una restricción, hay que volver al primer paso

La Teoría de Restricciones fue la culminación de los planteamientos que hizo Goldratt en la Tecnología de Producción Optimizada (OPT). En ella se definieron nueve reglas que resumen los principios básicos de este enfoque:

1. No se debe equilibrar la capacidad productiva, sino el flujo de producción
2. La utilización de un recurso no cuello de botella no viene determinado por su propia capacidad, sino por alguna otra limitación del sistema

³² Formulada por el físico israelí Eliyahu Goldratt

³³ DOMÍNGUEZ, J. Op. Cit., P. 270.

3. La utilización y la activación de un recurso no son la misma cosa
4. Una hora perdida en un cuello de botella³⁴ es una hora que pierde todo el sistema
5. Una hora ganada en un recurso no cuello de botella es un espejismo
6. Los cuellos de botella rigen tanto el inventario como la facturación del sistema
7. El lote de transferencia puede no ser, y de hecho muchas veces no debe ser, igual al lote en proceso
8. El lote de proceso debe ser variable a lo largo de su ruta y también en el tiempo
9. Las prioridades sólo se pueden fijar teniendo en cuenta simultáneamente todas las limitaciones del sistema.

El Interés de la Teoría de Restricciones en el Tamaño de Lote

La TOC define las restricciones como todo aquello que le impide a una organización alcanzar su meta, es decir, ganar más dinero. Deja claro que generalmente estas restricciones son criterios de decisión erróneos. Es aquí donde entra a jugar parte el problema del tamaño de lote.

Además de mostrar la determinación del tamaño de lote como un problema de decisión, la teoría de restricciones también establece la diferencia entre el lote de proceso y el lote de transferencia. Esto se evidencia en las reglas siete y ocho antes mencionadas. Plantea que al trabajar lotes de transferencia y de proceso de igual tamaño se incrementa el tiempo de ciclo y se acumulan más inventarios de producto en proceso.

Para garantizar un flujo relacionado con la demanda, es necesario sincronizar el paso de los trabajos por los diferentes recursos. Para lograr esto se trabaja con lotes de transferencia pequeños.

Por otra parte, La TOC explica que en cada recurso con capacidad restringida se deben realizar tres actividades: definir la secuencia de producción, el tamaño de lote de

³⁴ Recurso que posee una capacidad igual o inferior a la demanda

producción y el de transferencia. Con relación a la secuencia, establece debe estar en función de la fecha de entrega si el recurso con capacidad restringida no requiere tiempos de preparación o estos no son parámetros de consideración crítica. En cuanto a los tamaños de lote, dice que el tamaño de lote de producción debe ser igual al tamaño del pedido hecho por el cliente y que la variable que hay que definir es el tamaño de lote de transferencia. En este sentido, también propone el uso de lotes de transferencia pequeños ya que originan un mejor flujo de materiales con niveles de inventario menores pero no descuida el punto relacionado con el incremento en el manejo de materiales. Sin embargo advierte que cuando se requiere *setups* en los recursos con capacidad restringida, es necesario analizar otras posibilidades en cuanto a la secuenciación de los trabajos y determinar los tamaños de lote de proceso de otra manera.

2.4 APOYOS INFORMÁTICOS

Gracias al desarrollo de computadores con una mayor capacidad de almacenamiento y procesamiento de información se ha impulsado el diseño de programas que permitan la solución de problemas de investigación de operaciones en tiempos relativamente rápidos. Sin lugar a dudas, la ayuda que prestan hoy en día estos equipos computacionales al proceso de toma de decisiones ha hecho que cada vez más empresas recurran a este tipo de análisis para escoger alternativas y diseñar programas de acción en busca del mejoramiento de sus procesos productivos y administrativos.

Por lo tanto, los computadores con sus últimas actualizaciones, se han convertido en un soporte fundamental para la solución de los problemas de la programación de operaciones que, como se ha mencionado en repetidas ocasiones, se vuelven cada día más complejos.

En la presente investigación se utiliza el Sistema General de Modelización Algebraica, como lenguaje para dar solución a los 112 casos de estudio planteados como problemas de programación lineal entera mixta, y Cplex como optimizador.

2.4.1 Gams

El sistema general de modelización algebraica, Gams, es un lenguaje, soportado por un paquete informático, que permite especificar un problema de programación matemática independientemente del método de solución asociado al mismo³⁵. Gams permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización

Aunque inicialmente el manejo y comprensión de sus estructuras requiere cierto esfuerzo, una vez entendidas se dispone de una herramienta muy versátil en la solución de problemas de programación matemática. Por otra parte, es compatible para trabajar con varios optimizadores, entre ellos Cplex, que fue utilizado en el desarrollo de esta investigación.

No se puede empezar a utilizar el Gams sin antes tener claro el modelo que se va a resolver, este debe adecuarse a alguna de las estructuras de la programación lineal, programación lineal entera mixta, etc.

Luego se procede a escribir el modelo en Gams. Aunque el programa cuenta con un entorno sencillo y agradable para el usuario, la transcripción del modelo debe tener una secuencia lógica para que su solución sea apropiada. Por ejemplo, en Gams es sumamente importante la declaración de todos y cada uno de los parámetros que el modelo estipule, si alguno no se ha definido previamente no puede utilizarse en una operación posterior. Como aspectos para resaltar en la escritura de un modelo se cuenta con: Gams no distingue entre minúsculas y mayúsculas, posee un conjunto de caracteres válidos, tiene una lista de palabras y símbolos reservados para el sistema, la longitud máxima de una línea es de 120 caracteres.

Finalmente Gams soluciona el modelo en dos pasos: la compilación y la ejecución. En el primer paso se revisa que el modelo esté escrito correctamente; no se puede pretender que Gams evalúe la composición matemática del modelo sino que analiza la forma cómo

³⁵ MARIN, Jose Ignacio. Introducción al lenguaje Gams. Documentos de ayuda del programa Gams ide, P. 2.

se escribió y verifica el planteamiento con su estructura. En el segundo paso se llama a un optimizador para que solucione el problema.

Un modelo escrito en Gams consta de las siguientes partes³⁶:

Iniciación del programa	Incluye los comentarios descriptivos del modelo que sea pertinente ubicar
Opciones de programación	Acá se ubican las opciones generales de Gams que el usuario crea necesario activar o desactivar
Declaración de conjuntos	Está relacionado con los subíndices que se trabajan con las variables, los parámetros y las ecuaciones. Se especifican los conjuntos a tener en cuenta para estos subíndices con sus respectivos elementos. Si hay subíndices que son fruto de la combinación de otros conjuntos, aquí también se declaran.
Declaración de parámetros	Son datos de entrada numéricos para el modelo que no sufren modificaciones a lo largo de él. Generalmente son constantes que no se ven afectadas por ningún subíndice.
Declaración de variables	Aquí se definen las variables de decisión del modelo, su tipo y si es necesario, se fijan los límites o valores iniciales.
Declaración de ecuaciones	Generalmente definen las restricciones del modelo. No hay que olvidar definir la función objetivo. Consta de dos partes. En la primera

³⁶ Ibid. , P. 4

parte sencillamente se le otorga un nombre a cada una de las ecuaciones, asignando los subíndices concernientes. En la segunda se escriben algebraicamente cada una de las ecuaciones definidas anteriormente.

Declaración del modelo

Al modelo se le asigna un nombre para que Gams los reconozca y se define qué parte o partes se van a utilizar para la solución.

Lanzamiento del programa

Aquí se activa el proceso de optimización con el uso de una sentencia que incluye, no sólo la palabra que da inicio a esta acción, sino también el nombre del modelo, el tipo del programa que se va a solucionar y la variable que se va a minimizar o maximizar.

Informes de resultados

Las salidas que ofrece Gams son varias. Por defecto, Gams prepara ciertos informes de manera automática pero el usuario puede cambiarlos y especificar cuáles desea obtener.

La composición de cada una de las sentencias descritas anteriormente tiene sus particularidades, si se desea profundizar en ellas se pueden consultar los manuales disponibles en el software.

2.4.2 Cplex

Cplex es básicamente una herramienta que sirve para resolver problemas de optimización lineal. Aunque su alcance no se limita únicamente a problemas de programación lineal; también está en capacidad de resolver problemas de programación entera mixta, programación cuadrática y problemas de redes de flujo.

Entre las tecnologías que Cplex tiene a disposición para sus usuarios, la de interés para este estudio es el optimizador interactivo que posee. Este es un programa ejecutable que es capaz de leer problemas desde archivos que tengan ciertos formatos estándar, resuelve el problema y entrega la solución a un archivo de texto.

Dentro del optimizador general, Cplex cuenta con optimizadores particulares que se aplican dependiendo del tipo de problema que deba solucionar. Por ejemplo, para resolver problemas de programación lineal utiliza el método simplex, el método simplex dual, etc. Por otra parte, si está resolviendo problemas de programación entera, recurre a algoritmos de ramificación y acotación.

Cplex está diseñado para resolver problemas grandes y difíciles en tiempos relativamente cortos y con una mínima intervención del usuario.

2.4.3 Gams/Cplex

Cuando el Cplex se utiliza como optimizador del sistema general de modelización algebraica –Gams–, se combinan el alto nivel de capacidad que tiene Gams para modelar problemas con el poder optimizador de Cplex. Gams/Cplex calcula y fija automáticamente la mayoría de las opciones en los mejores valores para cada uno de los problemas específicos.

Una vez se tiene el modelo que desea resolverse mediante el lenguaje Gams, hay que indicarle que Cplex será el optimizador a utilizar, de lo contrario Gams acudirá al uso de algún otro programa para llevar a cabo esta función.

Cplex maneja la memoria de manera eficiente, sin embargo, al solucionar problemas de *scheduling*, puede presentarse uno de los problemas más comunes cuando se están corriendo problemas grandes, el de la memoria insuficiente. Aunque el programa trata de ajustarse a esta situación puede que el rendimiento se vea impactado negativamente.

Para el caso de los problemas de programación lineal entera mixta (llamados MIP en el programa), Gams/Cplex utiliza el método de ramificación y acotación, mencionado anteriormente, para darles solución. Encontrar resultados a este tipo de problemas lleva

más tiempo y utiliza más memoria que resolver problemas sencillos de programación lineal, todo depende de la complejidad del modelo planteado.

Son numerosas las opciones que tiene Gams/Cplex a disposición de los usuarios para la solución de problemas. Algunas son propias de Gams y pueden utilizarse con Cplex y viceversa. Los nombres de las opciones están íntimamente relacionados con las funciones que realizan y pueden separarse en las siguientes categorías:

- Opciones generales y de pre-procesamiento
- Opciones del algoritmo simplex
- Opciones de los límites de tolerancia para el simplex
- Opciones específicas del método de barrera (programación cuadrática)
- Opciones de los algoritmos de MIP
- Opciones de los límites de tolerancia para MIP
- Opciones de salida
- Archivo de las opciones de Gams/Cplex

Si se desea tener información más detallada sobre las diferentes funciones de Gams/Cplex se pueden consultar las ayudas disponibles en el programa Gamside, donde claramente se explica el funcionamiento de cada una de ellas.

3 ESTADO DEL ARTE

En la programación de operaciones, las investigaciones más recientes tratan problemas complejos y reúnen los aportes que estudios anteriores han arrojado; complementando de esta manera los hallazgos previos y dejando una pauta para el comienzo de nuevas disertaciones. Como se ha mencionado antes, básicamente los estudios sobre el problema de la programación de operaciones buscan generar soluciones que sirvan para programar un número de tareas en determinados ambientes de máquinas mientras se optimiza algún objetivo.

Como no se puede afirmar que existe un solo modelo que defina una configuración productiva general, ya que la realidad muestra que son innumerables los sistemas que aparecen en las organizaciones, cada investigación apunta a generar algoritmos³⁷ para solucionar el problema de la programación de operaciones para un modelo en particular.

Karmarkar³⁸ en 1987 analizó los tamaños de lote con relación a los tiempos de suministro y a los inventarios en proceso. Su objetivo fue estudiar, desde la perspectiva del costo, la relación entre los lotes de proceso utilizados y los tiempos de suministro alcanzados en un sistema.

Su estudio comienza resaltando la importancia de los tiempos de suministro dentro de la competitividad de las empresas. Recuerda que tiempos de suministro largos generan niveles de inventario en proceso más altos, al mismo tiempo que vuelve la programación de operaciones rígida al final de su ejecución y que por lo tanto, no permite cambios de última hora. Entre los trabajos relacionados con el tema de su estudio, destaca los de Zipkin en 1983 y de Karmarkar, Kekre y Kekre en 1981 y en 1985.

El análisis de la relación entre los tamaños de lote, los tiempos de suministro y los inventarios en proceso, lo hace mediante la ilustración de los modelos de filas de espera que aparecen en los sistemas multiproducto con varias máquinas. Hace referencia a la alta variabilidad a la que se ven sometidos estos sistemas, y cómo ésta es una de las

³⁷ Método repetitivo para resolver problemas. Secuencia codificada de instrucciones.

³⁸ KARMARKAR, Uday. Lot sizes, lead times and in-process inventories. En: Management Science. Vol 33 (1987); P. 409-418.

causas más importantes en la aparición de las colas entre estaciones de trabajo. Consideró las filas que aparecen en una configuración de una máquina y mostró gráficamente la relación del tiempo promedio del sistema en función del tamaño de lote; dejó claro que cuando se trabaja con un lote de proceso más grande, el tiempo promedio va alcanzando un comportamiento lineal con respecto a este tamaño del lote. Sin embargo, al tomar como referencia una configuración con varios productos y máquinas, señala cómo las demoras en el procesamiento de una tarea promueven la generación de colas para otro tipo de productos, además que, no se puede modificar únicamente el lote de proceso para una tarea, sino que es necesario cambiar los tamaños de todos los lotes y que por lo tanto los tiempos de suministro, para todas las tareas, también se ven afectados. Por otra parte, estableció que los costos del inventario en proceso generan un efecto que modifica el tamaño del lote que se había manejado comúnmente en el modelo de tamaño económico de pedido.

Sus conclusiones establecen que los modelos convencionales ignoran el impacto de los tamaños de lote en los tiempos de suministro y que por ésta razón fallan en la determinación de todos los costos asociados a estos últimos. Que aunque se utilicen los mejores tamaños de lote, éstos tienen un precio en los tiempos de suministro y en los inventarios en proceso que no puede ser descuidado.

El mismo año, otra publicación de Karmarkar³⁹ estuvo relacionada con el análisis de las demoras causadas en problemas de secuenciación determinísticos. Partiendo del principio que los tiempos de procesamiento se pueden mejorar si se modifican los tamaños de los lotes de proceso, examinó los retrasos que aparecen en estos tipos de problemas y estudió cuantitativamente el impacto de los cambios del tamaño de las tareas en medidas como *makespan* y *flow time mean*. En este caso, únicamente trabajó con lotes de proceso.

Tomó una configuración productiva con varios trabajos, varias máquinas y varias rutas, definió una serie de parámetros y mediante una formulación matemática con vectores, que representan las decisiones acerca de la ruta de procesamiento de las tareas, enunció cómo el tiempo de procesamiento para una tarea es una función lineal del tamaño de lote en el que es procesada. Por otra parte, estableció que las tanto el *makespan* como el *flow*

³⁹ KARMARKAR, Uday. Lot sizing and sequencing delays. En: Management Science. Vol 33 (1987); P. 419-423.

time mean, no pueden acercarse a cero, a medida que se reduce el tamaño de los lotes, debido a la presencia de los tiempos de preparación.

En cuanto a la productividad de los sistemas, determina que ésta también se ve afectada por la reducción del tamaño de los lotes, es decir, que cuando éstos disminuyen, y se elaboran menos productos, el índice de productividad se ve empañado. Razón por la cual, no pueden sencillamente fijarse tamaños de lote muy pequeños.

Su conclusión está orientada a establecer que los métodos de secuenciación no son la única forma de controlar los tiempos de producción; que decisiones como el tamaño de lote utilizado en el sistema tiene un mayor impacto en medidas como *makespan* y *flow time mean*.

Benjaafar⁴⁰ en 1996 amplió el modelo propuesto previamente por Karmarkar para estudiar la relación entre el tamaño de los lotes y los tiempos de suministro. Su objetivo fue estudiar esta misma relación, pero haciendo la diferencia entre los lotes de proceso y de transferencia.

Mostró, matemática y gráficamente, el comportamiento del *flow time mean* debido al impacto del tamaño de los lotes. A medida que el lote de proceso se hace más grande, también aumenta el tiempo de procesamiento y disminuye la frecuencia de los *setup*, elevando la capacidad del sistema. Sin embargo, al aumentar este tamaño de forma considerable, las ventajas alcanzadas pueden verse afectadas ya que comienza a elevarse el *flow time mean*. Cuando considera el efecto de los lotes de transferencia, muestra que el retraso que éstos experimentan en las colas es proporcional a su tamaño; que lotes de transferencia pequeños inducen lotes de proceso grandes. Además, que el lote de transferencia óptimo es de una unidad, y que sus beneficios son similares aún cuando se tienen largos tiempos de preparación o de procesamiento. Tuvo en cuenta el manejo de materiales como aspecto importante en el desempeño de los sistemas. Teniendo en cuenta lo anterior, analizó que en sistemas reales, cuando se trabaja con lotes de transferencia de una unidad, se aumenta de manera considerable el manejo de materiales generando al mismo tiempo demoras en el sistema; entonces, que si no se cuenta con la capacidad apropiada, lotes de transferencia muy pequeños no son óptimos para todas las configuraciones productivas.

⁴⁰ BENJAAFAR, Saifallah. On production batches, transfer batches, and lead times. En: IIE Transactions. Vol. 28 (1996); P. 357-362.

Concluye que, que de acuerdo a la capacidad y propiedades de las configuraciones productivas, la idea fundamental es establecer la combinación apropiada, entre pequeños lotes de transferencia y grandes lotes de producción, que sea capaz de mejorar el comportamiento del sistema.

Demeulemeester y Herroelen⁴¹ presentaron en 1996 los resultados de su trabajo, en el cual analizaron la programación de operaciones, con distintos tamaños de lote de proceso y de transferencia, usando redes de actividad. Su objetivo principal era mostrar cómo la modelación de procedimientos de solución para el problema de la programación de proyectos con restricción de recursos, puede ser usada en la programación de operaciones de sistemas reales que involucran tiempos de preparación independientes de la secuencia y lotes de proceso y de transferencia distintos.

Comienzan utilizando asunciones del problema general de programación de proyectos, que involucran las relaciones de precedencia entre un par de actividades, como analogía para la programación de operaciones.

En el desarrollo del trabajo muestran la programación de operaciones con redes de actividad y el comportamiento del *makespan* bajo seis diferentes escenarios. Los escenarios se dan gracias a la posibilidad de superponer operaciones consecutivas, debido a la diferenciación que se hace entre lotes de proceso y de transferencia. Estos varían de acuerdo a los tamaños de lote de proceso y de lote de transferencia utilizados, de esta forma, el estudio modela las distintas configuraciones trabajando con tiempos de preparación independientes de la secuencia. Como método de solución recurren al procedimiento de ramificar y acotar, trabajado por los mismos autores, en 1992, para el tratamiento del problema de la programación de proyectos.

Llegan a la conclusión que cualquier reducción que se haga en el tamaño de lote de transferencia tendrá un impacto directo en la disminución del *makespan*.

Por otra parte, analiza el comportamiento de los sistemas informáticos en términos del tiempo de solución requerido para solucionar problemas de programación de operaciones y determinan que, a medida que se reducen los tamaños de lote de transferencia se hacen más complejos los problemas y por lo tanto se requieren mayores tiempos para encontrar una solución.

⁴¹ DEMEULEMEESTER, Eric and HEROELEN, Willy. Modelling setup times, process batches and transfer batches using activity network logic. En: European journal of operational research. Vol. 89 (1996); P. 355-365.

Benjaafar y Sheikhzadeh⁴² en 1997 examinaron el impacto de las políticas de programación de operaciones en las decisiones sobre los tamaños de lote en sistemas de producción multiproducto. Su objetivo se centró en comparar el desempeño de la regla FCFS (first come first served) con la regla GS (group scheduling), y estudiar el efecto de cada una en el tamaño de lote óptimo.

Mencionan que es preferible procesar los trabajos en lotes mayores a uno cuando los tiempos de preparación son significativos, sin exceder en el fraccionamiento de los lotes pues los el desempeño del sistema se ve deteriorado.

Mediante comparaciones de las dos reglas aplicadas en modelos productivos sencillos, concluye que la regla GS trae más beneficios sustanciales en el comportamiento del sistema que la regla FCFS; gracias a que reduce los tiempos de suministro, brinda tasas de producción más altas y permite la programación de una mayor variedad de productos.

Langevin, Riopel y Stecke⁴³ en 1999 presentaron métodos para determinar el tamaño óptimo para los lotes de transferencia, entre dos máquinas, minimizando los costos totales; sin dejar de lado la obtención de buenos niveles de utilización de máquinas al realizar la programación de las operaciones.

Tomaron como caso de referencia un sistema *flow shop* con dos máquinas y dos productos a fabricar, los cuales son transportados entre las estaciones en vehículos automatizados. Su mayor aporte es que todos los costos relevantes que deben ser tomados en cuenta, en la decisión del tamaño del lote de transferencia, fueron considerados. Los autores resaltan los trabajos de Potts y Baker (1989), Trietsch y Baker (1993) y de Baker y Jia (1993).

Tomaron cuatro componentes del costo total: costos de manejo de materiales (costos fijos y variables debidos al uso de los materiales), costos de estibas (costos de preparación y utilización de los contenedores), costos de oportunidad por el capital requerido para el inventario en proceso (función de la duración de la operación), costos de máquina (tiempo en el cual la máquina no está siendo utilizada). Los costos indirectos fueron fijados como porcentajes de acuerdo a la orden que era procesada.

⁴² BENJAAFAR, S. and SHEIKHZADEH, M. Scheduling policies, batch sizes, and manufacturing lead times. En: IIE Transactions. Vol. 29 (1997); P. 159-166.

⁴³ LANGEVIN, Andre; RIOPEL, Diane and STECKE, Kathryn. Transfer batch sizing in flexible manufacturing systems. En: Journal of manufacturing systems. Vol. 18 (1999); P. 140-151.

Definieron que, cuando se está fabricando un solo tipo de pieza, el tamaño del lote de transferencia óptimo es la derivada de la suma de todos los costos mencionados. Evaluaron la fórmula para distintos escenarios, cambiando el valor de los parámetros, para mirar la composición del costo total; encontraron que entre los cuatro componentes, el costo de máquina es el que ocupa el mayor porcentaje, mientras que los otros tres son relativamente pequeños en comparación a éste. También evaluaron los resultados de otros dos métodos con el propuesto y a lo largo de las distintas comparaciones se obtuvieron costos menores con el método desarrollado en la investigación.

Por otra parte, cuando se están elaborando dos tipos de piezas, dejan claro que se hace más complicada la programación de operaciones y definen un sistema sin interrupciones como modelo del estudio. Utilizan la regla de Johnson para determinar el orden óptimo en que deben ser procesadas las piezas y definen la función objetivo, en función del costo, que debe ser minimizada.

Los aportes del estudio están encaminados a dejar una base sobre cómo determinar el tamaño óptimo de los lotes de transferencia cuando la situación se analiza desde la perspectiva del costo. Propone que el método sea una heurística para casos más complejos que involucren un mayor número de piezas y de máquinas.

4 DISEÑO METODOLOGICO

4.1 TIPO DE ESTUDIO

La ingeniería industrial como ciencia fáctica es demostrable a través de sus teorías, se apoya en la investigación científica para dar cumplimiento al proceso de comprobación de sus supuestos.

La investigación científica busca dar solución a un problema particular del conocimiento. Su desarrollo se basa en la aplicación del método científico para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento originado alrededor de la situación problemática planteada.

Este estudio se ubica dentro de la investigación aplicada, ya que busca confrontar los planteamientos teóricos existentes sobre el tema del loteo en la programación de operaciones, con el comportamiento real de distintos tamaños de lote de transferencia en una configuración productiva, con el fin de contribuir en la realización de aplicaciones que mejoren los niveles de competitividad de las empresas. Además, como lo menciona Tamayo (2002)⁴⁴, sigue una de las cualidades más importantes de esta forma de investigación: estudiar un problema concreto, en circunstancias y características concretas.

La investigación aplicada puede ser cualitativa o cuantitativa, y cada una de ella cuenta con distintos tipos en su clasificación. Particularmente este trabajo se ubica en la investigación cuantitativa, y dentro de ella, hace parte de la investigación experimental.

En el área de producción este tipo de investigación ha sido muy utilizado, ya que muchas veces lo que se pretende explicar son las relaciones de causa y efecto que existen entre las múltiples variables que hacen parte de los sistemas productivos, es decir, se desea

⁴⁴ TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. 4 ed. México : Limusa S.A, 2002.

determinar de qué forma una determinada variable está incidiendo en el comportamiento de un sistema.

En este caso se considera como objeto de estudio la configuración productiva de un taller de tipo *flow shop* propuesto por el Instituto Avraham Y. Goldratt⁴⁵, ésta se presenta más adelante en la Figura 7. En ella se analiza el impacto de cuatro tamaños de lote de transferencia, variable independiente, en el comportamiento de dos medidas de eficacia, variables dependientes. Aquí la variable que se tiene bajo control es precisamente el tamaño de lote de transferencia, que es modificada para analizar el efecto de estos cambios en cada una de las variables dependientes.

4.1.1 Factores de investigación

En la presente investigación se evalúa el desempeño de un sistema productivo del tipo *flow-shop* (todos los productos siguen una misma secuencia de fabricación), trabajando 4 tipos de lote de transferencia, 2 medidas de eficacia y 2 demandas, cada una de ellas con 7 niveles; por lo tanto, serán 112 los casos de estudio.

Medidas de Eficacia

El comportamiento del sistema productivo se evaluó en términos de dos medidas de eficacia: el *makespan* y el *flow time mean*, ambas definidas en unidades de tiempo. Aunque la explicación de su significado se hizo en el Capítulo 2, es oportuno mencionarlo nuevamente:

- *Makespan*: también conocido como el instante de salida de la última pieza del taller. Es el tiempo en el que termina de ser procesada la última tarea en el sistema, o equivalentemente, en la última máquina.
- *Flow Time Mean*: o tiempo medio de permanencia en el taller. Esta medida de eficacia promedia la salida de todas las tareas que están siendo elaboradas en el taller; minimiza el tiempo promedio de terminación de todas ellas.

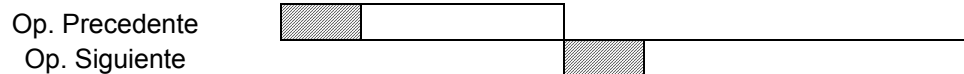
⁴⁵ La configuración está disponible en el kit de autoformación "Producción: cómo mejorar con TOC" que distribuye el instituto para fines pedagógicos.

Relación Lote de Transferencia / Lote de proceso

Los cuatro tipos de lote de transferencia utilizados están definidos según su tamaño y con relación al lote de proceso utilizado. Este factor ha sido llamado **Relación** para efecto de su posterior uso en el análisis de los datos.

- Lotes de transferencia igual al lote de proceso: denominado en la investigación **Igual**. En este caso, el lote de transferencia tiene exactamente el mismo tamaño del lote de proceso, es decir, las piezas son trasladadas de una estación a otra una vez ha sido procesado todo el lote y no antes.

Figura 3. Relación $LT / LP = Igual$ (ejemplo)

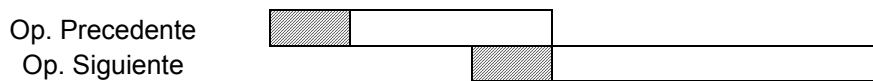


la parte sombreada representa el tiempo de preparación

Fuente: autora del proyecto

- Lotes de transferencia igual al lote de proceso con tiempos de preparación anticipados: denominado en la investigación **Igual-setup**. Al igual que la situación anterior, el lote de transferencia tiene el mismo tamaño que el lote de proceso, pero en este caso, el tiempo de preparación de la máquina que va a recibir las piezas puede comenzar antes que éstas lleguen, ya que se considera que no son necesarias para realizar el alistamiento de los recursos y que por lo tanto, éste puede realizarse mientras las piezas son procesadas en la operación anterior.

Figura 4. Relación $LT / LP = Igual - setup$ (ejemplo)

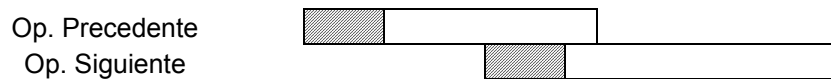


la parte sombreada representa el tiempo de preparación

Fuente: autora del proyecto

- Lotes de transferencia igual a la mitad del lote de proceso: denominado en la investigación **Medio**. El tamaño del lote de transferencia es equivalente a medio lote de proceso, es decir, el traslado de las piezas se lleva a cabo, de una estación a otra, cuando se ha procesado la mitad del lote y no antes.

Figura 5. Relación $LT / LP = \text{Medio}$ (ejemplo)



la parte sombreada representa el tiempo de preparación

Fuente: autora del proyecto

- Lotes de transferencia de una unidad: denominado en la investigación **Unidad**. En este caso, inmediatamente una pieza termine su procesamiento en una estación, puede pasar a la siguiente, es decir, el traslado entre máquinas se hace de una en una.

Figura 6. Relación $LT / LP = \text{Unidad}$ (ejemplo)



la parte sombreada representa el tiempo de preparación

Fuente: autora del proyecto

Cuando se trabaja con lotes de transferencia más pequeños que los lotes de proceso, superponer las operaciones consecutivas es una de las acciones que puede implementarse. El inicio de una operación siguiente se puede adelantar hasta el momento en que se garantice que su terminación se da una vez ha concluido la fabricación de las piezas en la operación siguiente y teniendo en cuenta que la primera pieza del lote de la operación siguiente sólo puede comenzar a fabricarse una vez ha concluido su proceso en la operación precedente.

Demandas

En la investigación se trabajó con una demanda básica y una demanda aumentada. La demanda básica se planteó como un indicador inicial para evaluar el impacto de los cuatro tipos de lote de transferencia en distintos escenarios de requerimientos de máquina. Por otra parte, la demanda aumentada, se propuso para valorar los mismos tamaños de lote de transferencia en situaciones que necesitaran un mayor índice de uso de los recursos y para minimizar el impacto de los tiempos de preparación en el análisis del comportamiento de las dos medidas de eficacia.

Como se mencionó en el Capítulo 1, la demanda aumentada es el resultado de la multiplicación por 10 de los valores de la demanda básica; es por esto que en este informe la demanda aumentada recibe el nombre de **Demanda Básica X 10**.

Cada una de las demandas, Demanda Básica y Demanda Básica X 10, cuenta con 7 cantidades a producir, entonces los 8 productos trabajan con 14 niveles en total. Las cantidades requeridas para los productos, en la demanda básica, fueron generadas de forma aleatoria considerando valores mayores que 1 y menores que 50. En la Tabla 6 se muestra la demanda básica.

Teniendo los datos de la demanda básica, las cantidades de la demanda básica X 10 se calcularon haciendo la multiplicación respectiva. Estos resultados aparecen en la Tabla 7.

Con la definición de los anteriores factores, se puede evaluar la incidencia de los distintos tipos de Relación en el *makespan* y el *flow time mean* para la configuración productiva, al mismo tiempo que se analiza el comportamiento de los cuatro tamaños de lote de transferencia bajo escenarios de demanda diferentes.

La Tabla 8 resume los factores de investigación que han sido definidos para el presente estudio.

Tabla 6. Demanda Básica para la investigación

	Demanda Básica (unid)							
Niveles	Prod 1	Prod 2	Prod 3	Prod 4	Prod 5	Prod 6	Prod 7	Prod 8
1	13	10	15	5	15	10	20	4
2	33	33	34	7	8	5	5	5
3	5	5	5	50	50	5	5	5
4	5	5	5	7	8	33	34	33
5	3	3	4	30	30	20	20	20
6	20	20	20	5	5	20	20	20
7	20	20	20	30	30	3	4	3

Tabla 7. Demanda Básica X 10 para la investigación

	Demanda Básica X 10 (unid)							
Niveles	Prod 1	Prod 2	Prod 3	Prod 4	Prod 5	Prod 6	Prod 7	Prod 8
1	130	100	150	50	150	100	200	40
2	330	330	340	70	80	50	50	50
3	50	50	50	500	500	50	50	50
4	50	50	50	70	80	330	340	330
5	30	30	40	300	300	200	200	200
6	200	200	200	50	50	200	200	200
7	200	200	200	300	300	30	40	30

Tabla 8. Factores de Investigación

Factores de Investigación	
Configuración Productiva	<i>Flow Shop</i>
Medidas de Eficacia	<i>Makespan</i> <i>Flow Time Mean</i>
Relación Lote de Transferencia / Lote de Proceso	Igual Igual – <i>setup</i> Medio 1 unidad
Nivel de Demanda	Básica Básica x 10

4.2 BUSQUEDA DE INFORMACION BIBLIOGRAFICA

En la consulta bibliográfica se recopiló la información sobre el tema de la planeación y el control de los sistemas productivos, y dentro de ella se puntualizó en la programación de operaciones en los talleres de trabajo, con el propósito de consolidar las bases teóricas necesarias para el desarrollo de la investigación.

Todas las fuentes consultadas fueron secundarias⁴⁶. Los temas principales alrededor de los cuales giró esta revisión fueron: el problema de la programación de operaciones y sus particularidades, los algoritmos de solución desarrollados para la solución de este problema, el problema del loteo, Justo a Tiempo y Teoría de Restricciones, manejo y ejecución de Gams/Cplex.

Inicialmente se exploraron las bases de datos Hw Wilson y BD ProQuest, disponibles en la biblioteca de la UIS, para la búsqueda de artículos publicados en revistas científicas que hayan tratado el tema del fraccionamiento de lotes en la programación de operaciones.

La búsqueda fue complementada con una inspección posterior en Internet, donde no sólo se consultaron artículos, sino también estudios de universidades y grupos de investigación, monografías, aplicaciones y síntesis sobre los temas principales, con el propósito de profundizar en el conocimiento de la programación de operaciones.

Por otra parte, se indagó el contenido de los libros de producción referenciados, acerca de cuáles son las teorías en el tema de la programación de operaciones actualmente aceptadas en el entorno académico. Estas fuentes mostraron las características de los sistemas productivos, los tipos de programación que se hacen de acuerdo a ellos, generalidades del Justo a Tiempo y de la Teoría de Restricciones, leyes para la secuenciación y consideraciones relevantes en el tema del loteo; información que permitió hacer la compilación necesaria para enunciar el marco teórico del estudio.

⁴⁶ En las cuales otros investigadores o científicos han dejado plasmados sus aportes.

Para el uso del programa estadístico SPSS se consultaron tutoriales disponibles en Internet sobre el uso de las distintas opciones para el análisis de los datos.

4.3 DEFINICION Y PARAMETRIZACION DEL MODELO

El primer paso en el desarrollo de la investigación, luego de completar la revisión bibliográfica inicial, fue la familiarización con el modelo de programación lineal entera mixta, formulado para la configuración productiva objeto de estudio, y con Gams/Cplex. El análisis del modelo de PLEM, que como se mencionó en el Capítulo 1, fue formulado en la tesis doctoral “Evaluación del Sistema de Programación de Operaciones DBR”⁴⁷, se hizo con el objeto de reconocer e identificar sus distintos componentes y su relación con la programación de las operaciones en el taller de trabajo. Por otra parte, la exploración de Gams/Cplex buscó conocer la forma como se escriben este tipo de problemas en el lenguaje y verificar cuáles son las soluciones que brinda el programa para el problema planteado.

4.3.1 Descripción del Modelo General de Investigación

La configuración productiva utilizada como situación de estudio aparece en la Figura 7. Está diseñada para fabricar 8 productos diferentes a lo largo de 18 operaciones que son realizadas en 4 tipos de máquinas.

Nomenclatura de la configuración productiva

Para su comprensión, y próximo modelado en Gams/Cplex, se estableció una nomenclatura de la siguiente manera:

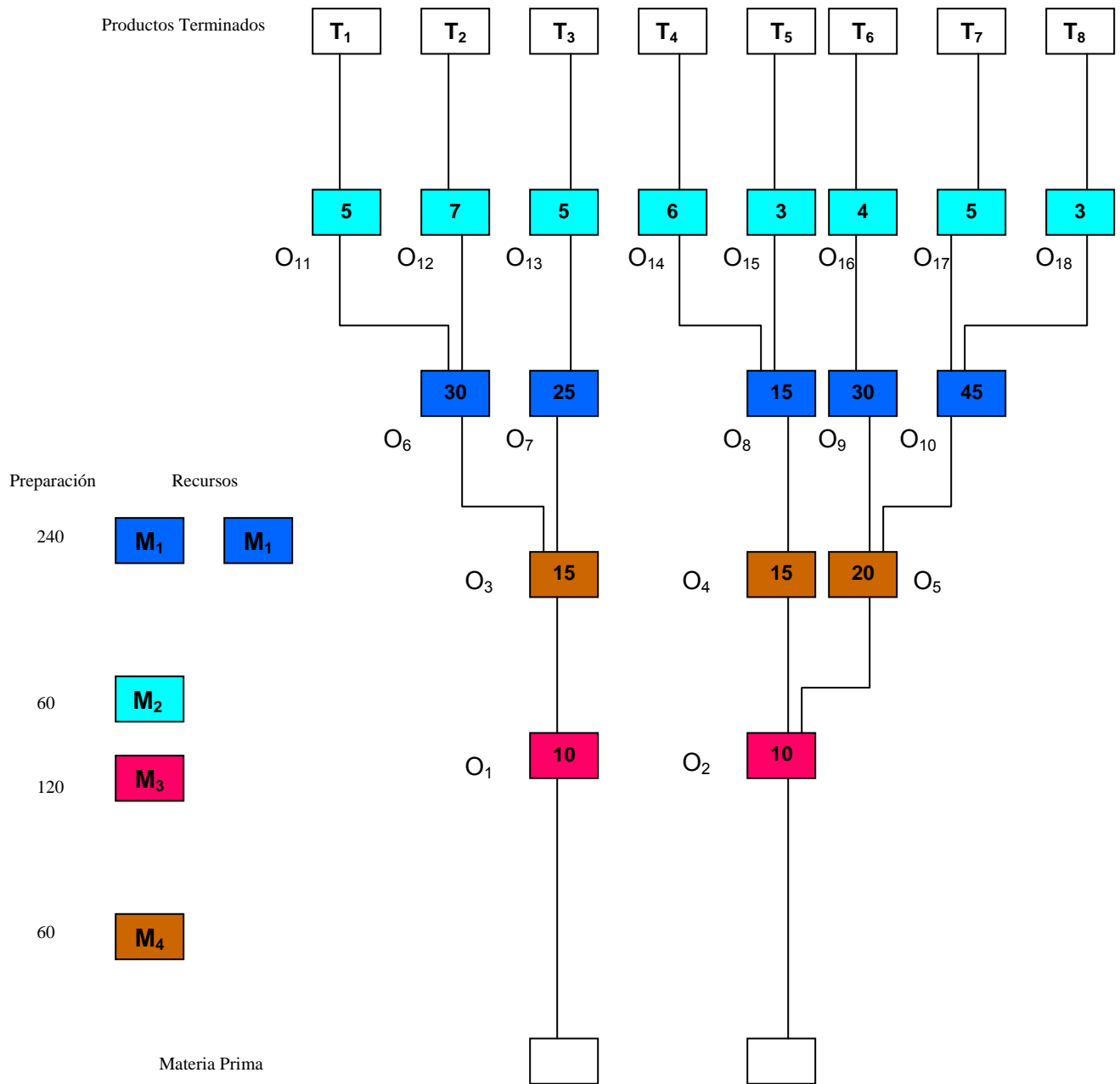
- Tareas

Una tarea es la elaboración total del conjunto de artículos de cada producto cuya cantidad es definida por los diferentes niveles de demanda establecidos. Su nomenclatura

⁴⁷ NIÑO, M. Op. Cit.

comienza con la letra “T” seguida de un dígito entre 1 y 8 que indica el número del producto a fabricar. En la Tabla 9 se resume la nomenclatura de las tareas.

Figura 7. Configuración Productiva



- Operaciones

La fabricación de las tareas requiere 18 operaciones. Su nomenclatura comienza con la letra “O” seguida de un número entre 1 y 18 que representa la operación. En la Tabla 10 se resume la nomenclatura de las operaciones.

- Máquinas

Las operaciones son realizadas en 4 tipos diferentes de máquinas. Su nomenclatura comienza con la letra “M” seguida de 2 números, de los cuales, el primero representa el tipo de máquina, es decir, un dígito entre 1 y 4; y el segundo indica el número de la unidad de la máquina, es decir, 1 si se refiere a la unidad 1 de algún tipo de máquina o 2 si se refiere a la unidad 2. En la Tabla 11 se resume la nomenclatura de las máquinas.

Tabla 9. Nomenclatura de las tareas para la configuración productiva de estudio

Tareas	
T ₁	Tarea 1
T ₂	Tarea 2
T ₃	Tarea 3
T ₄	Tarea 4
T ₅	Tarea 5
T ₆	Tarea 6
T ₇	Tarea 7
T ₈	Tarea 8

Tabla 10. Nomenclatura de las operaciones para la configuración productiva de estudio

Operaciones			
O ₁	Operación 1	O ₁₀	Operación 10
O ₂	Operación 2	O ₁₁	Operación 11
O ₃	Operación 3	O ₁₂	Operación 12
O ₄	Operación 4	O ₁₃	Operación 13
O ₅	Operación 5	O ₁₄	Operación 14
O ₆	Operación 6	O ₁₅	Operación 15
O ₇	Operación 7	O ₁₆	Operación 16
O ₈	Operación 8	O ₁₇	Operación 17
O ₉	Operación 9	O ₁₈	Operación 18

Tabla 11. Nomenclatura de las máquinas para la configuración productiva de estudio

Máquinas	
M ₁₁	Primera unidad de la máquina 1
M ₁₂	Segunda unidad de la máquina 1
M ₂₁	Primera unidad de la máquina 2
M ₃₁	Primera unidad de la máquina 3
M ₄₁	Primera unidad de la máquina 4

Descripción General

Teniendo clara la denominación anterior, la configuración productiva muestra la secuencia de fabricación para ocho productos diferentes. Las ocho tareas se realizan en cuatro tipos de máquinas, de las cuales, tres de ellas cuentan con 1 unidad (M₂₁, M₃₁, M₄₁) y solo una posee 2 unidades (M₁₁, M₁₂), en el gráfico las máquinas aparecen diferenciadas mediante colores. La secuencia de producción cuenta con 18 operaciones, el nombre de cada una aparece al lado izquierdo de la máquina en la que se realiza y su duración se indica en el interior del cuadro que representa la máquina.

Las operaciones están distribuidas para los ocho productos y su fabricación comienza desde el nivel inferior, en el cual se observan dos grandes divisiones que asocian las diferentes tareas. Es decir, las tareas 1, 2 y 3 inician su proceso con la operación 1, mientras que las tareas 4, 5, 6, 7 y 8 inician con la operación 2; aunque por ser un sistema del tipo *flow-shop* ambas operaciones se realizan en la misma máquina M₃₁. La fabricación de cada producto requiere el empleo de 4 operaciones, por ejemplo, para elaborar el producto 3, es necesario que una materia prima sea procesada en la máquina 3 durante 10 unidades de tiempo, luego que este producto intermedio pase a la máquina 4 para ser procesada durante 15 unidades de tiempo para que después pase a alguna de las máquinas 1 y que durante 25 unidades de tiempo sea procesada y que finalmente se traslade a la máquina 2 para que después de 5 unidades de tiempo termine su fabricación. Por otro lado, los tiempos de preparación de las máquinas están dados para cada una de la siguiente manera: el tiempo de preparación para las máquinas 1 es de 240 unidades de tiempo, el de la máquina 2 es de 60 unidades de tiempo, el de la máquina 3 es de 120 unidades de tiempo y el de la máquina 4 es de 60 unidades de tiempo. Estos

tiempos de preparación se mantienen constantes, por lo que se consideran independientes de la secuencia.

Códigos para los casos de estudio

Debido a la gran cantidad de casos de análisis que fueron empleados a lo largo de la investigación, fruto de la combinación de los factores del estudio, se creó un código que los representara y que procurara su cómodo, pero al mismo tiempo, ágil manejo y su adecuada identificación.

El código que se definió está compuesto por 4 parámetros que recopilan los factores definidos para la investigación. Se representa de la siguiente manera:

- 1er parámetro: Nombre del modelo

El nombre general para el modelo de estudio se definió teniendo en cuenta la designación que se hizo del mismo en la tesis doctoral.

Tabla 12. Parámetro: nombre del modelo

Nombre del Modelo	
m3	

Fuente: autora del proyecto

- 2do parámetro: Medida de eficacia

Teniendo en cuenta que como medidas de eficacia se utilizan el *makespan* y el *flow time mean*, a cada una de ellas se les asignó un número para identificar los casos de estudio.

Tabla 13. Parámetro: medidas de eficacia

Medidas de Eficacia	
1	<i>Makespan</i>
2	<i>Flow Time Mean</i>

Fuente: autora del proyecto

- 3er parámetro: Relación lote de transferencia lote de proceso

En la investigación se trabajaron cuatro relaciones de lote de transferencia y lote de proceso, a cada una de ellas se le asignó un número entre 1 y 4 que las permitiera identificar.

Tabla 14. Parámetro: relación LT / LP

Relación LT / LP		
Código	Palabra característica	Descripción
1	Igual	Lote de transferencia igual al lote de proceso
2	Igual – <i>setup</i>	Lote de transferencia igual al lote de proceso (con <i>setup</i>)
3	Medio	Lote de transferencia igual a medio lote de proceso
4	Unidad	Lote de transferencia igual a 1 unidad

Fuente: autora del proyecto

- 4to parámetro: Nivel de demanda

Este parámetro se identifica con el uso de dos números, donde el primero de ellos es un 0 o un 1 y representa si se está trabajando con la demanda básica o con la demanda básica X 10, respectivamente; el segundo número establece el nivel de demanda utilizado dentro de ellas, es decir, un número entre 1 y 7.

Entonces, si por ejemplo se trabaja el caso que tiene como medida de eficacia el *makespan*, donde el tamaño del lote de transferencia es la mitad del lote de proceso y que va a fabricar la cantidad establecida por el nivel 5 de la demanda básica; este caso se identifica con el código: m3-1-3-05.

Tabla 15. Parámetro nivel de demanda

Nivel de Demanda			
01	Nivel 1 de la demanda básica	11	Nivel 1 de la demanda básica multiplicada por diez
02	Nivel 2 de la demanda básica	12	Nivel 2 de la demanda básica multiplicada por diez
03	Nivel 3 de la demanda básica	13	Nivel 3 de la demanda básica multiplicada por diez
04	Nivel 4 de la demanda básica	14	Nivel 4 de la demanda básica multiplicada por diez
05	Nivel 5 de la demanda básica	15	Nivel 5 de la demanda básica multiplicada por diez
06	Nivel 6 de la demanda básica	16	Nivel 6 de la demanda básica multiplicada por diez
07	Nivel 7 de la demanda básica	17	Nivel 7 de la demanda básica multiplicada por diez

Fuente: autora del proyecto

4.3.2 Modelización del problema del taller de trabajo por medio de la Programación Lineal Entera Mixta y en Gams/Cplex

La formulación de la configuración productiva como un modelo de programación lineal y su correspondiente modelización en Gams/Cplex corresponde a la definida en la tesis doctoral antes mencionada.

En el modelo, la determinación de la secuencia en que se procesan los lotes en los diferentes recursos se hace mientras es optimizada una medida de eficacia. Su explicación se presenta en el Anexo A.

La modelización en Gams/Cplex sigue la estructura propia del lenguaje mediante la declaración de conjuntos, parámetros, variables y ecuaciones, al mismo tiempo que define la minimización de la variable relacionada con la medida de eficacia que se desea optimizar. Su descripción se expone en el Anexo B.

4.3.3 Parametrización del modelo

Una vez se comprendió la forma como el modelo de PLEM se escribe en el lenguaje de Gams/Cplex, el siguiente paso consistió en calcular los parámetros para los casos de estudio. Se utilizaron dos modelos generales, uno para cada medida de eficacia. Como se mencionó antes, su diferencia radica en una pequeña variante que se hace en la formulación de la restricción para la última operación.

Según la descripción anterior, para cada uno de los 112 casos fue necesario especificar los siguientes parámetros:

- Tiempo de proceso unitario
- Tiempo de proceso de lote
- Tiempo de inicio más temprano posible

Parámetro tiempo de proceso unitario – P

Este parámetro se refiere al tiempo que demora, en minutos, para ser procesada una unidad en cada operación. El valor que tomó este parámetro para cada una de las 18 operaciones de la configuración, se mantuvo constante en los 112 casos de estudio. Es decir, la O_1 tuvo, en todos los casos, como tiempo de proceso unitario un valor de 10 minutos.

En la Tabla 16 aparecen los valores utilizados para el Parámetro P de cada operación.

Parámetro tiempo de proceso de lote – PL

Este parámetro corresponde al tiempo necesario para realizar todo el lote de proceso en cada operación, incluyendo el tiempo de preparación. Se calculó para cada una de las demandas, básica y básica X 10, del *makespan* y estos valores se repitieron en los casos del *flow time mean* respectivos. El valor del parámetro no cambia entre los cuatro tipos de tamaño de lote de transferencia sino entre niveles de demanda, ya que depende de la cantidad de unidades a procesar.

Tabla 16. Parámetro P para el modelo

Operación	Parámetro P (min)
O ₁	10
O ₂	10
O ₃	15
O ₄	15
O ₅	20
O ₆	30
O ₇	25
O ₈	15
O ₉	30
O ₁₀	45
O ₁₁	5
O ₁₂	7
O ₁₃	5
O ₁₄	6
O ₁₅	3
O ₁₆	4
O ₁₇	5
O ₁₈	3

Fuente: autora del proyecto

Su valor se obtuvo de la multiplicación entre el tiempo de proceso unitario de la operación por el número de piezas a elaborar en ella, sumando el valor del tiempo de alistamiento de la máquina donde se realiza la operación.

El lote de proceso incluye todas las piezas de las tareas que utilizan la operación en su ruta de fabricación. Por ejemplo, las T₁, T₂ y T₃ son las tareas que requieren de la O₁, entonces cuando se va a calcular el parámetro PL para esta operación, el tamaño de lote incluye las cantidades de cada una de las tres tareas para el nivel de demanda correspondiente.

En la Tabla 17 se relacionan las tareas correspondientes a cada operación para la determinación del tamaño de lote y del parámetro PL.

Tabla 17. Tareas correspondientes a cada operación

Operación	Tareas	Operación	Tareas
O ₁	T ₁ . T ₂ . T ₃	O ₁₀	T ₇ . T ₈
O ₂	T ₄ . T ₅ . T ₆ . T ₇ . T ₈	O ₁₁	T ₁
O ₃	T ₁ . T ₂ . T ₃	O ₁₂	T ₂
O ₄	T ₄ . T ₅	O ₁₃	T ₃
O ₅	T ₆ . T ₇ . T ₈	O ₁₄	T ₄
O ₆	T ₁ . T ₂	O ₁₅	T ₅
O ₇	T ₃	O ₁₆	T ₆
O ₈	T ₄ . T ₅	O ₁₇	T ₇
O ₉	T ₆	O ₁₈	T ₈

Fuente: autora del proyecto

Teniendo definidas cuáles tareas corresponden a cada operación, se establecieron las cantidades a fabricar para cada una de ellas, según el nivel de demanda utilizado.

A modo de ejemplo se presenta el cálculo del parámetro PL para la O₁ del nivel 1 de la demanda básica.

$$PL = \text{tiempo de preparación } O_1 + (\text{tiempo de proceso unitario } O_1)(\text{demanda total } O_1)$$

$$PL = 120 + (10)(38) = 120 + 380 = 500$$

El parámetro PL para las operaciones del nivel 1 de la demanda básica se encuentra en la Tabla 18. Los cálculos restantes aparecen en el Anexo C.

Parámetro tiempo de inicio más temprano posible – TT y TT₂

Este parámetro indica el tiempo mínimo entre los momentos de inicio para la operación siguiente. Define el instante en el que el lote de transferencia pasa de una estación a otra, por lo que puede llamarse también Tiempo de Transferencia.

Este traslado de piezas depende de la Relación a la que el caso hizo referencia, por lo tanto su valor fue modificado de un tamaño de lote de transferencia a otro y de un nivel de demanda a otro; entonces, cambió para los 56 casos de cada medida de eficacia.

Tabla 18. Parámetro PL para las operaciones del nivel 1 de la demanda básica

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso unitario	Demanda Total	PL
O ₁	120	10	38	500
O ₃	60	15	38	630
O ₆	240	30	23	930
O ₁₁	60	5	13	125
O ₁₂	60	7	10	130
O ₇	240	25	15	615
O ₁₃	60	5	15	135
O ₂	120	10	54	660
O ₄	60	15	20	360
O ₈	240	15	20	540
O ₁₄	60	6	5	90
O ₁₅	60	3	15	105
O ₅	60	20	34	740
O ₉	240	30	10	540
O ₁₆	60	4	10	100
O ₁₀	240	45	24	1320
O ₁₇	60	5	20	160
O ₁₈	60	3	4	72

Fuente: autora del proyecto

Para efecto de la escritura del modelo en Gams/Cplex, se definieron TT y TT_2 por separado debido a que hay operaciones que son punto de divergencia en la configuración. Aquellas que tienen dos operaciones siguientes, y que por lo tanto se consideran de este tipo, son O₂, O₃, O₅, O₆, O₈ y O₁₀.

La Tabla 19 muestra la definición de los dos parámetros, TT y TT_2 , en Gams/Cplex.

El cálculo de este parámetro se explica por medio de dos ejemplos, en los cuales se programan dos operaciones sucesivas para los cuatro tamaños de lote de transferencia. Teniendo en cuenta las consideraciones que se mencionan en el Anexo A, se toman las operaciones O₁-O₃ (operación siguiente tiene un parámetro tiempo de proceso más largo que el de la operación precedente) y O₆-O₁₁ (operación siguiente tiene un parámetro

tiempo de proceso más corto que el de la operación precedente), para el nivel 1 de la demanda básica. La información para los cálculos aparece en la Tabla 20. Los parámetros TT y TT₂ para los demás casos aparecen en el Anexo D.

Tabla 19. Definición del parámetro TT y TT₂ en Gams/Cplex

Parámetro	Designación en Gams/Cplex	Hace referencia a:	
		Operación precedente	Operación siguiente
TT	t1.o1.m31	O ₁	O ₃
	t1.o3.m41	O ₃	O ₆
	t1.o6.m11	O ₆	O ₁₁
	t3.o7.m11	O ₇	O ₁₃
	t4.o2.m31	O ₂	O ₄
	t4.o4.m41	O ₄	O ₈
	t4.o8.m11	O ₈	O ₁₄
	t6.o5.m41	O ₅	O ₉
	t6.o9.m11	O ₉	O ₁₆
	t7.o10.m11	O ₁₀	O ₁₇
TT ₂	t1.o6.m11	O ₆	O ₁₂
	t1.o3.m41	O ₃	O ₇
	t4.o8.m11	O ₈	O ₁₅
	t4.o2.m31	O ₂	O ₅
	t6.o5.m41	O ₅	O ₁₀
	t7.o10.m11	O ₁₀	O ₁₈

Fuente: autora del proyecto

Tabla 20. Variables para realizar los cálculos del Tiempo de Transferencia (ejemplo)

Operación	Máquina	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso unitario	Demanda Total	PL
O ₁	M ₃₁	120	10	38	500
O ₃	M ₄₁	60	15	38	630
O ₆	M ₁₁ -M ₁₂	240	30	23	930
O ₁₁	M ₂₁	60	5	13	125

Primera Situación: Operaciones O_1 y O_3

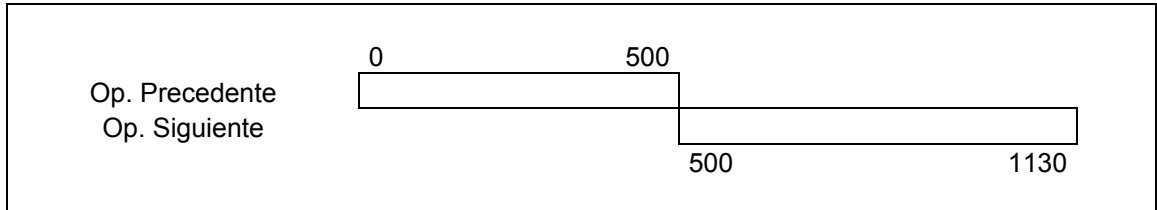
- **Relación LT / LP: Igual**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado todo el lote, sin tener en cuenta el tiempo de preparación de la máquina de la operación siguiente. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso exactamente cuando la operación precedente ha finalizado.

$$TT = PL \text{ (op. preced.)}$$

$$TT = 500$$

Figura 8. Relación LT / LP = Igual (O_1 - O_3)



Fuente: autora del proyecto

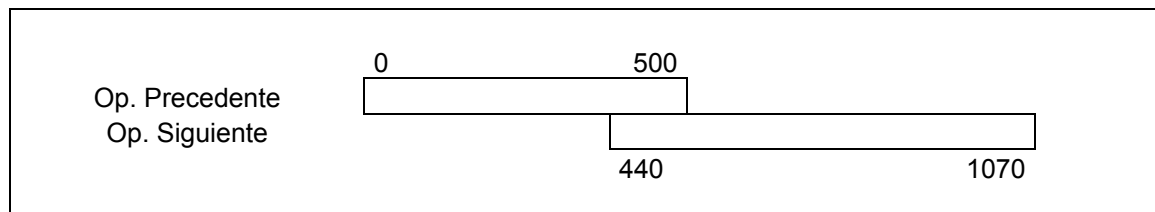
- **Relación LT / LP: Igual – setup**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado todo el lote, teniendo en cuenta el tiempo de preparación de la operación siguiente. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso cuando la operación precedente ha finalizado, restándole el tiempo de preparación de la máquina en la que se llevará a cabo la operación siguiente.

$$TT = PL \text{ (op. preced.)} - T. \text{ preparación máq. (op. Sig.)}$$

$$TT = 500 - 60 = 440$$

Figura 9. Relación LT / LP = Igual – setup (O_1 - O_3)



Fuente: autora del proyecto

- Relación LT / LP: **Medio**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado la mitad del lote. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso cuando se ha procesado la mitad del lote (incluyendo el tiempo de preparación de la máquina de la operación precedente), restándole el tiempo de preparación de la máquina en la que se llevará a cabo la operación siguiente.

$$TT = T. \text{ Proc. de medio lote (op. preced.)} - T. \text{ preparación máq. (op. sig)}$$

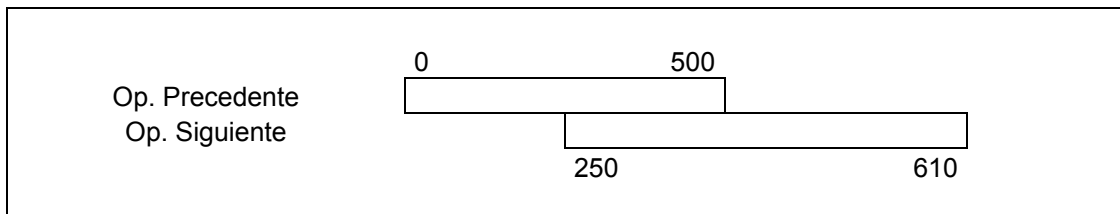
$$TT = 310 - 60 = 250$$

Donde el tiempo de proceso de medio lote es:

$$T. \text{ Proc. medio lote} = T. \text{ prep. máq. (op. Prec)} + (\frac{1}{2} \text{ Lote proc.})(\text{tiem. proc. unit})$$

$$= 120 + (19 \text{ unid} \times 10 \text{ t/unid}) = 120 + 190 = 310$$

Figura 10. Relación LT / LP = Medio (O₁-O₃)



Fuente: autora del proyecto

- Relación LT / LP: **Unidad**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado una unidad del lote. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso cuando se ha procesado una unidad del lote (incluyendo el tiempo de preparación de la máquina de la operación precedente), restándole el tiempo de preparación de la máquina en la que se llevará a cabo la operación siguiente.

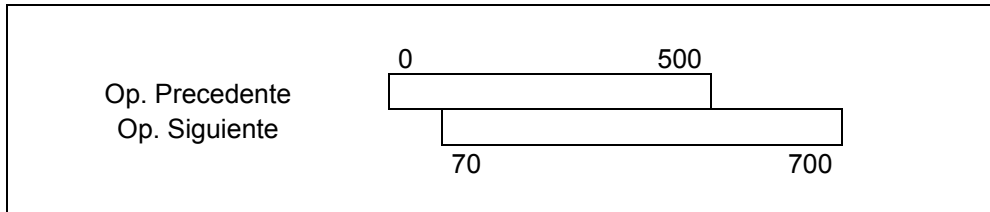
$$TT = T. \text{ Proc. de 1 unid (op. preced.)} - T. \text{ preparación máq. (op. sig)}$$

$$TT = 130 - 60 = 70$$

Donde el tiempo de proceso de 1 unidad es:

$$T. \text{ Proc. de 1 uni} = T. \text{ prep. máq. (op. Prec)} + (\text{tiem. proc. unit}) = 120 + 10 = 130$$

Figura 11. Relación $LT / LP = \text{Unidad}$ (O_1-O_3)



Fuente: autora del proyecto

Segunda Situación: Operaciones O_6 y O_{11}

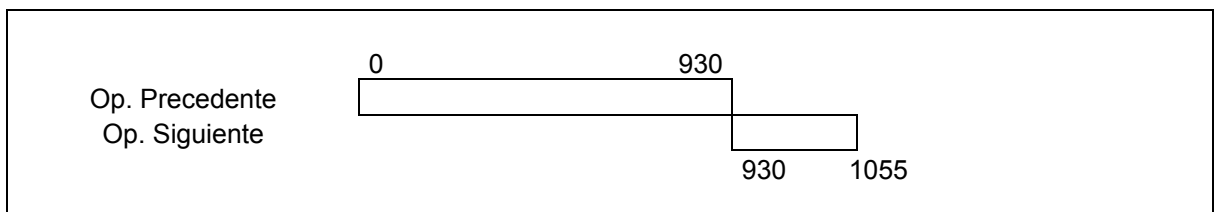
- Relación LT / LP : **Igual**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado todo el lote, sin tener en cuenta el tiempo de preparación de la máquina de la operación siguiente. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso exactamente cuando la operación precedente ha finalizado.

$$TT = PL \text{ (op. preced.)}$$

$$TT = 930$$

Figura 12. Relación $LT / LP = \text{Igual}$ (O_6-O_{11})



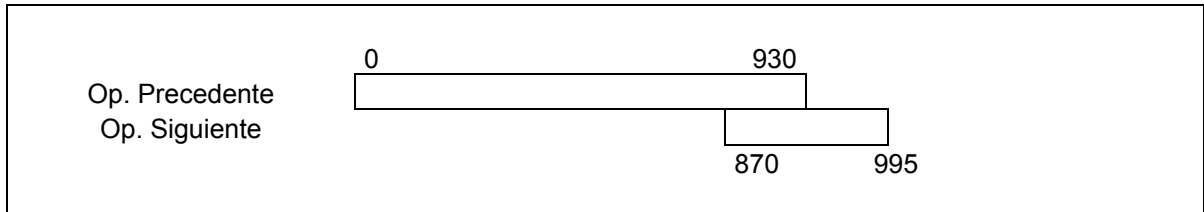
Fuente: autora del proyecto

- Relación LT / LP : **Igual – setup**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado todo el lote, teniendo en cuenta el tiempo de preparación de la operación siguiente. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso cuando la operación precedente ha finalizado, restándole el tiempo de preparación de la máquina en la que se llevará a cabo la operación siguiente.

$$TT = PL \text{ (op. preced.)} - T. \text{ preparación máq. (op. Sig.)} = TT = 930 - 60 = 870$$

Figura 13. Relación $LT / LP = Igual - setup$ (O_6-O_{11})



Fuente: autora del proyecto

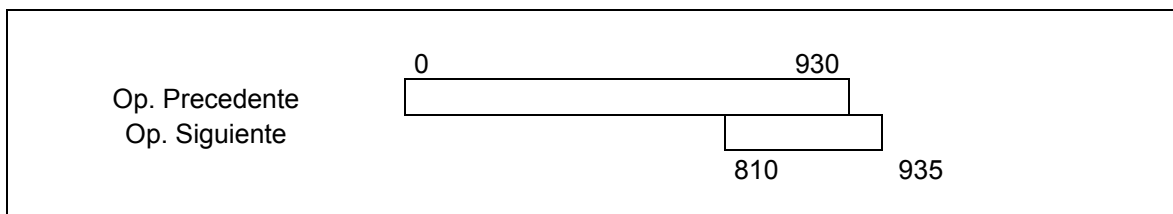
- Relación LT / LP : **Medio**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado la mitad del lote, garantizando que la elaboración de la última pieza en la operación siguiente comience una vez ha terminado su fabricación en la operación precedente. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso una vez la operación precedente ha finalizado, sumándole el tiempo requerido para elaborar una pieza en la operación siguiente y restándole el parámetro PL de la operación siguiente.

$$TT = PL (op. preced.) + P(op. sig) - PL (op. sig)$$

$$TT = 930 + 5 - 125 = 810$$

Figura 14. Relación $LT / LP = Medio$ (O_6-O_{11})



Fuente: autora del proyecto

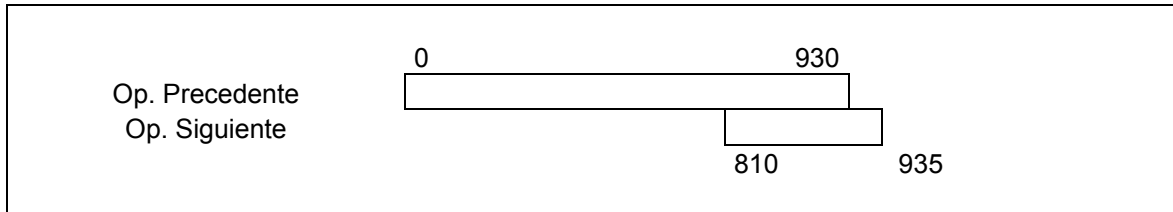
- Relación LT / LP : **Unidad**

El lote se transfiere de la operación precedente a la operación siguiente cuando se ha procesado una unidad del lote, garantizando que la elaboración de la última pieza en la operación siguiente comience una vez ha terminado su fabricación en la operación precedente. Por lo tanto, la operación siguiente inicia su proceso una vez la operación precedente ha finalizado, sumándole el tiempo requerido para elaborar una pieza en la operación siguiente y restándole el parámetro PL de la operación siguiente.

$$TT = PL (\text{op. preced.}) + P(\text{op. sig}) - PL (\text{op. sig})$$

$$TT = 930 + 5 - 125 = 810$$

Figura 15. Relación LT / LP = Unidad (O₆-O₁₁)



Fuente: autora del proyecto

4.4 PROCESAMIENTO Y SOLUCION DE CADA UNO DE LOS CASOS PLANTEADOS

Una vez definidos los parámetros P , PL , TT y TT_2 para los 112 casos, se procedió a correr cada uno de ellos en Gams/Cplex para obtener su solución. Primero se procesaron los 56 casos que tenían como medida de eficacia el *makespan* y posteriormente los 56 del *flow time mean*.

La clasificación de la corrida de los programas se hizo teniendo en cuenta que, para el análisis estadístico posterior, debía considerarse la aleatoriedad dentro de las condiciones de experimentación. Lo anterior con el propósito de garantizar que la ejecución y los resultados del programa no estuvieran sometidos a algún tipo de sesgo ocasionado por el orden en que eran lanzados los programas en Gams/Cplex. El proceso de asignación del turno de corrida para los casos de estudio se presenta en el Anexo E.

4.5 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez definida toda la información necesaria, modelo, parámetros y turno, se corrieron los 112 casos de estudio. Gams/Cplex inicialmente compila para identificar posibles errores, y luego aplica el algoritmo de solución para minimizar la función objetivo.

Gams/Cplex ofrece múltiples opciones para los informes de salida del programa, para ver el texto completo de éstos para el caso m3-1-1-01 ir al anexo F. Dentro de éste, la información de interés para el estudio es aquella que presenta el valor de la función objetivo, el tipo de respuesta, el tiempo de inicio para cada operación y la asignación de máquinas correspondiente.

A modo de ejemplo, la continuación se muestra, en negrilla, el valor de la función objetivo y el tipo de respuesta obtenido para el caso m3-1-1-01.

Informe de salida en Gams/Cplex para el caso m3-1-1-01

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	19	SINGLE EQUATIONS	286
BLOCKS OF VARIABLES	7	SINGLE VARIABLES	126
NON ZERO ELEMENTS	802	DISCRETE VARIABLES	102

GENERATION TIME = 0.046 SECONDS 1.6 Mb WIN207-133

EXECUTION TIME = 0.046 SECONDS 1.6 Mb WIN207-133

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	tipo3	OBJECTIVE	t
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	235

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION

**** MODEL STATUS 1 **OPTIMAL**

**** OBJECTIVE VALUE **3407.0000**

RESOURCE USAGE, LIMIT	19.765	259200.000
ITERATION COUNT, LIMIT	58387	10000

Los resultados para los casos del *makespan* y del *flow time mean* aparecen en las Tablas 21 y 22.

En sólo un caso, de los 112 del estudio, se obtuvo una respuesta de tipo entera. Al tomar el caso del *flow time mean* para el lote de transferencia igual al lote de proceso, con

setup, para el nivel 2 de la demanda básica X 10 (caso **m3-2-2-12**), el programa no fue capaz de encontrar una solución óptima como si lo hizo para los demás, sólo pudo encontrar una solución entera factible para el modelo. Este caso se corrió 4 veces, sin cambiar las opciones en que se debía ejecutar Cplex, para corroborar que no se lograba mejorar la categoría de la solución.

Tabla 21. Resultados en Gams/Cplex para el *makespan*

Código	Resultado en Gams/Cplex	Tipo de Solución
m3-1-1-01	3407	óptima
m3-1-1-02	5491	óptima
m3-1-1-03	5220	óptima
m3-1-1-04	6744	óptima
m3-1-1-05	5350	óptima
m3-1-1-06	5100	óptima
m3-1-1-07	4239	óptima
m3-1-2-01	3047	óptima
m3-1-2-02	5131	óptima
m3-1-2-03	4860	óptima
m3-1-2-04	6384	óptima
m3-1-2-05	4990	óptima
m3-1-2-06	4740	óptima
m3-1-2-07	3879	óptima
m3-1-3-01	2530	óptima
m3-1-3-02	3693	óptima
m3-1-3-03	3586	óptima
m3-1-3-04	4713	óptima
m3-1-3-05	3169	óptima
m3-1-3-06	3783	óptima
m3-1-3-07	3064	óptima
m3-1-4-01	2317	óptima
m3-1-4-02	2855	óptima
m3-1-4-03	2448	óptima
m3-1-4-04	3453	óptima
m3-1-4-05	2886	óptima
m3-1-4-06	3098	óptima

m3-1-4-07	2529	óptima
m3-1-1-11	27760	óptima
m3-1-1-12	49300	óptima
m3-1-1-13	46540	óptima
m3-1-1-14	63120	óptima
m3-1-1-15	46640	óptima
m3-1-1-16	44630	óptima
m3-1-1-17	36300	óptima
m3-1-2-11	27400	óptima
m3-1-2-12	48940	óptima
m3-1-2-13	46180	óptima
m3-1-2-14	62760	óptima
m3-1-2-15	46280	óptima
m3-1-2-16	44270	óptima
m3-1-2-17	35940	óptima
m3-1-3-11	21983	óptima
m3-1-3-12	34314	óptima
m3-1-3-13	31288	óptima
m3-1-3-14	46023	óptima
m3-1-3-15	27703	óptima
m3-1-3-16	34605	óptima
m3-1-3-17	26796	óptima
m3-1-4-11	16898	óptima
m3-1-4-12	22811	óptima
m3-1-4-13	21925	óptima
m3-1-4-14	30393	óptima
m3-1-4-15	23292	óptima
m3-1-4-16	26575	óptima
m3-1-4-17	21423	óptima

Fuente: autora del proyecto

Tabla 22. Resultados en Gams/Cplex para el *flow time mean*

Código	Resultado en Gams/Cplex	Tipo de Solución	Flow Time Mean*
m3-2-1-01	20542	óptima	2568
m3-2-1-02	25701	óptima	3213
m3-2-1-03	23765	óptima	2971
m3-2-1-04	34023	óptima	4253
m3-2-1-05	26376	óptima	3297
m3-2-1-06	27960	óptima	3495
m3-2-1-07	24726	óptima	3091
m3-2-2-01	17662	óptima	2208
m3-2-2-02	22821	óptima	2853
m3-2-2-03	20910	óptima	2614
m3-2-2-04	31203	óptima	3900
m3-2-2-05	23556	óptima	2945
m3-2-2-06	25080	óptima	3135
m3-2-2-07	21906	óptima	2738
m3-2-3-01	13247	óptima	1656
m3-2-3-02	13667	óptima	1708
m3-2-3-03	14437	óptima	1805
m3-2-3-04	20122	óptima	2515
m3-2-3-05	12782	óptima	1598
m3-2-3-06	18550	óptima	2319
m3-2-3-07	17363	óptima	2170
m3-2-4-01	12056	óptima	1507
m3-2-4-02	11592	óptima	1449
m3-2-4-03	12898	óptima	1612
m3-2-4-04	14332	óptima	1792
m3-2-4-05	11423	óptima	1428
m3-2-4-06	15832	óptima	1979
m3-2-4-07	14383	óptima	1798
m3-2-1-11	162050	óptima	20256
m3-2-1-12	202460	óptima	25308
m3-2-1-13	188160	óptima	23520
m3-2-1-14	286770	óptima	35846
m3-2-1-15	214620	óptima	26828
m3-2-1-16	235540	óptima	29443

m3-2-1-17	207840	óptima	25980
m3-2-2-11	159230	óptima	19904
m3-2-2-12	199580	entera	24948
m3-2-2-13	185340	óptima	23168
m3-2-2-14	283950	óptima	35494
m3-2-2-15	211800	óptima	26475
m3-2-2-16	232660	óptima	29083
m3-2-2-17	205020	óptima	25628
m3-2-3-11	115595	óptima	14449
m3-2-3-12	120647	óptima	15081
m3-2-3-13	128063	óptima	16008
m3-2-3-14	178228	óptima	22279
m3-2-3-15	115157	óptima	14395
m3-2-3-16	166900	óptima	20863
m3-2-3-17	155207	óptima	19401
m3-2-4-11	87750	óptima	10969
m3-2-4-12	92773	óptima	11597
m3-2-4-13	106273	óptima	13284
m3-2-4-14	120035	óptima	15004
m3-2-4-15	89795	óptima	11224
m3-2-4-16	133732	óptima	16717
m3-2-4-17	121079	óptima	15135

Fuente: autora del proyecto

* Resultado en Gams/Cplex dividido en 8, el equivalente al número de tareas.

Otra forma de mostrar los resultados para el *makespan* y el *flow time mean* es de acuerdo a los niveles de demanda, relacionándolos con el respectivo tamaño de lote de transferencia. Esta presentación se encuentra en las Tablas 23, 24, 25 y 26.

Tabla 23. Resultados del *makespan* para los niveles de la Demanda Básica

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual	3407	5491	5220	6744	5350	5100	4239
Igual setup	3047	5131	4860	6384	4990	4740	3879
Medio	2530	3693	3586	4713	3169	3783	3064
Unidad	2317	2855	2448	3453	2886	3098	2529

Tabla 24. Resultados del *makespan* para los niveles de la Demanda Básica X 10

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual	27760	49300	46540	63120	46640	44630	36300
Igual – setup	27400	48940	46180	62760	46280	44270	35940
Medio	21983	34314	31288	46023	27703	34605	26796
Unidad	16898	22811	21925	30393	23292	26575	21423

Fuente: autora del proyecto

Tabla 25. Resultados del *flow time mean* para los niveles de la Demanda Básica

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual	2568	3213	2971	4253	3297	3495	3091
Igual – setup	2208	2853	2614	3900	2945	3135	2738
Medio	1656	1708	1805	2515	1598	2319	2170
Unidad	1507	1449	1612	1792	1428	1979	1798

Fuente: autora del proyecto

Tabla 26. Resultados del *flow time mean* para los niveles de la Demanda Básica X 10

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual	20256	25308	23520	35846	26828	29443	25980
Igual – setup	19904	24948	23168	35494	26475	29083	25628
Medio	14449	15081	16008	22279	14395	20863	19401
Unidad	10969	11597	13284	15004	11224	16717	15135

Fuente: autora del proyecto

El informe de salida en Gams/Cplex correspondiente al tiempo de inicio para cada operación y a la asignación de máquinas, para el caso m3-1-1-01, se muestra a continuación.

Informe de salida en Gams/Cplex para el caso m3-1-1-01

---- VAR x **Tiempo de inicio operacion**

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
t1.01 .m31	.	.	+INF	1.000	
t1.03 .m41	.	500.000	+INF	.	
t1.06 .m11	.	1130.000	+INF	.	
t1.06 .m12	.	.	+INF	EPS	
t1.011.m21	.	2060.000	+INF	.	
t2.012.m21	.	2345.000	+INF	.	
t3.07 .m11	.	1985.000	+INF	.	
t3.07 .m12	.	1400.000	+INF	.	
t3.013.m21	.	2475.000	+INF	.	
t4.02 .m31	.	500.000	+INF	.	
t4.04 .m41	.	2015.000	+INF	.	
t4.08 .m11	.	2600.000	+INF	.	
t4.08 .m12	.	.	+INF	EPS	
t4.014.m21	.	3140.000	+INF	.	
t5.015.m21	.	3230.000	+INF	.	
t6.05 .m41	.	1275.000	+INF	.	
t6.09 .m11	.	2060.000	+INF	.	
t6.09 .m12	.	.	+INF	EPS	
t6.016.m21	.	2610.000	+INF	.	
t7.010.m11	.	.	+INF	EPS	
t7.010.m12	.	2015.000	+INF	.	
t7.017.m21	.	2185.000	+INF	.	
t8.018.m21	.	3335.000	+INF	.	
		LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL

---- VAR t

	-INF	3407.000	+INF	.
--	------	----------	------	---

t Makespan

---- VAR y

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1.06 .m11	.	1.000	1.000	4100.000
t1.06 .m12	.	.	1.000	EPS
t3.07 .m11	.	.	1.000	EPS
t3.07 .m12	.	1.000	1.000	EPS
t4.08 .m11	.	1.000	1.000	4100.000
t4.08 .m12	.	.	1.000	EPS
t6.09 .m11	.	1.000	1.000	EPS
t6.09 .m12	.	.	1.000	EPS
t7.010.m11	.	.	1.000	EPS
t7.010.m12	.	1.000	1.000	EPS

Como información complementaria de la investigación y para uso de futuros estudios relacionados, con los resultados anteriores se elaboró la secuencia de uso de máquinas para cada caso.

La variable Y asigna, en el caso de la M_1 , a qué máquina corresponde cada operación, mientras que la variable X muestra el tiempo de inicio de cada una. Como se conoce cuál es la duración de las 18 operaciones entonces se puede establecer completamente la utilización de los recursos. En la Tabla 27 se muestra el uso de máquinas para el caso m3-1-1-01; para los demás, se presenta en el Anexo G.

Tabla 27. Uso de máquinas para el caso m3-1-1-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
M ₁₁	O ₆	1130	930	2060
M ₁₁	O ₉	2060	540	2600
M ₁₁	O ₈	2600	540	3140
M ₁₂	O ₇	1400	615	2015
M ₁₂	O ₁₀	2015	1320	3335
M ₂₁	O ₁₁	2060	125	2185
M ₂₁	O ₁₇	2185	160	2345
M ₂₁	O ₁₂	2345	130	2475
M ₂₁	O ₁₃	2475	135	2610
M ₂₁	O ₁₆	2610	100	2710
M ₂₁	O ₁₄	3140	90	3230
M ₂₁	O ₁₅	3230	105	3335
M ₂₁	O ₁₈	3335	72	3407
M ₃₁	O ₁	0	500	500
M ₃₁	O ₂	500	660	1160
M ₄₁	O ₃	500	630	1130
M ₄₁	O ₅	1275	740	2015
M ₄₁	O ₄	2015	360	2375

Fuente: autora del proyecto

5 PROCESO DE ANALISIS Y HALLAZGOS

5.1 ANALISIS ESTADISTICO DE LA MEDIDA DE EFICACIA *MAKESPAN*

Los resultados obtenidos para el *makespan* se analizan estadísticamente. Se recurre al uso del programa SPSS como herramienta informática de soporte en la realización de este proceso.

5.1.1 Análisis descriptivo

El análisis descriptivo se hace con el propósito de conocer algunas características de la variable que se estudia para de este modo formarse una idea sobre su comportamiento.

En este caso la variable a estudiar es la medida de eficacia *makespan*. Su comportamiento se evalúa en cada uno de los grupos definidos por los cuatro tamaños de lote de transferencia. Como cada uno de estos grupos se determina según la correspondencia que se da entre el lote de transferencia y el lote de proceso recibe el nombre de Relación. La explicación y denominación de los tipos de tamaño de lote de transferencia se hizo en la sección 4.1.1.

Tabla 28. Tipo de Relación

Tipo de Relación en cuanto al tamaño del lote de transferencia		
Nombre general de la Relación	Tamaño del lote de transferencia para la Relación	Nombre en SPSS
R 1	LT = LP	1
R 2	LT = LP – setup	2
R 3	LT = medio LP	3
R 4	LT = unidad	4

Fuente: autora del proyecto

El análisis también se hace, por separado, para la demanda básica y para la demanda básica X 10. Hay que aclarar que como para cada tarea se utilizaron siete niveles de

demanda dentro de la demanda básica y siete dentro de la demanda básica X 10, se trabaja con ese mismo número de datos en las cuatro relaciones.

Makespan Demanda Básica

Procedimiento General

- Inicialmente se hallan los siguientes estadísticos descriptivos para cada una de las cuatro poblaciones: media, desviación típica, error típico, límite inferior y superior del intervalo de confianza para la media, dato mínimo y dato máximo.
- Se grafican los datos obtenidos en cada nivel de demanda para las cuatro configuraciones de tamaño de lote, y se estudia el comportamiento de los resultados.

Resultados en SPSS

Estadísticos Descriptivos

Tabla 29. Estadísticos descriptivos para el *makespan* de la demanda básica

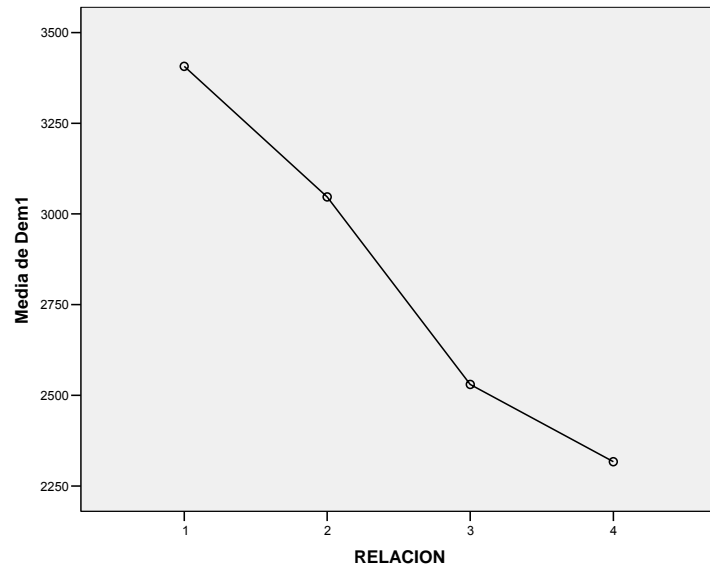
Descriptivos								
MAKESPAN								
	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
1	7	5078,71	1043,784	394,513	4113,37	6044,05	3407	6744
2	7	4718,71	1043,784	394,513	3753,37	5684,05	3047	6384
3	7	3505,43	687,563	259,874	2869,54	4141,32	2530	4713
4	7	2798,00	399,216	150,889	2428,79	3167,21	2317	3453
Total	28	4025,21	1223,773	231,271	3550,68	4499,74	2317	6744

Fuente: SPSS

Gráfico de las medias

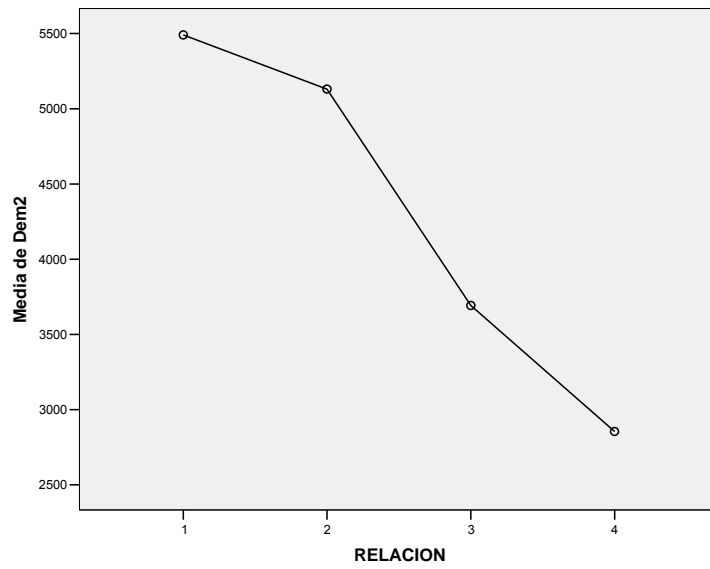
Se grafican los valores obtenidos para cada clase de Relación a lo largo de los siete niveles de la demanda básica, para examinar el comportamiento de cada uno bajo distintos escenarios.

Figura 16. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica - *makespan*



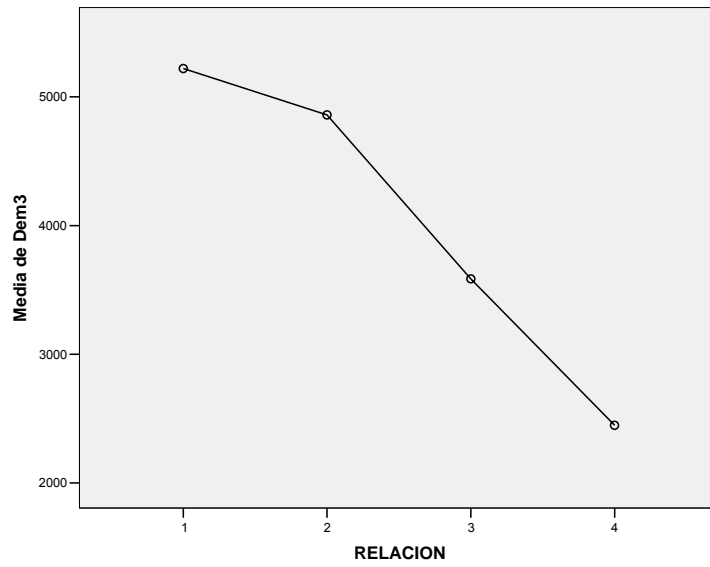
Fuente: SPSS

Figura 17. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica - *makespan*



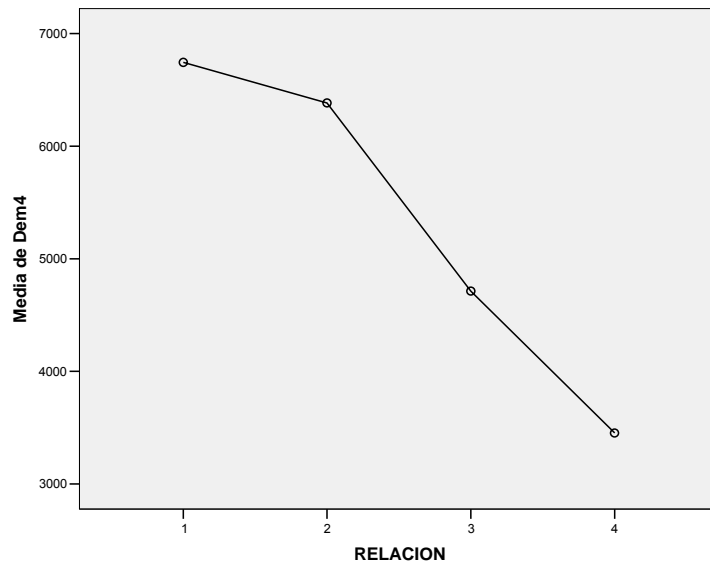
Fuente: SPSS

Figura 18. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica - *makespan*



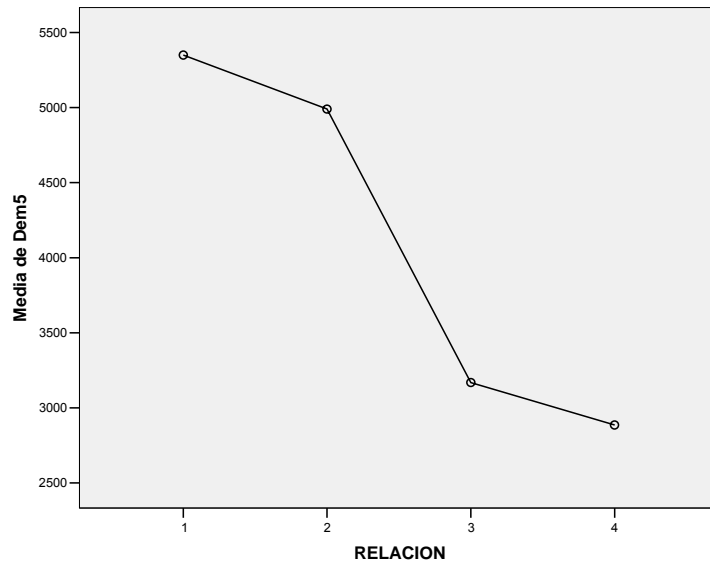
Fuente: SPSS

Figura 19. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica - *makespan*



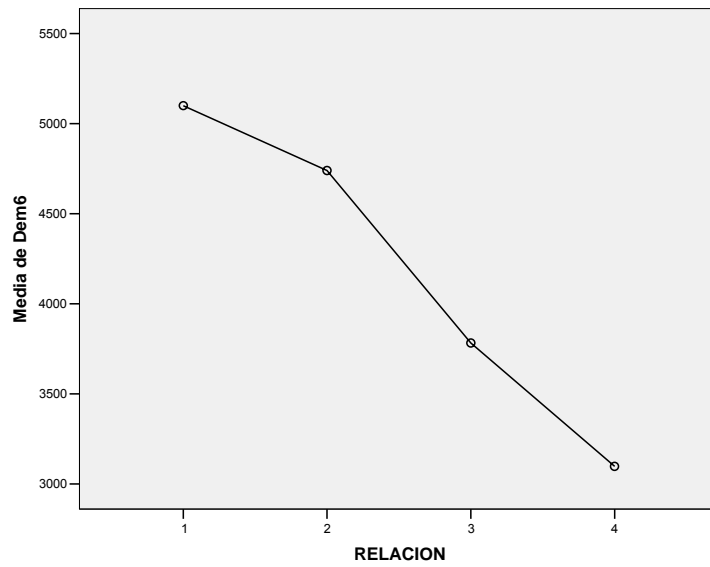
Fuente: SPSS

Figura 20. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica - *makespan*



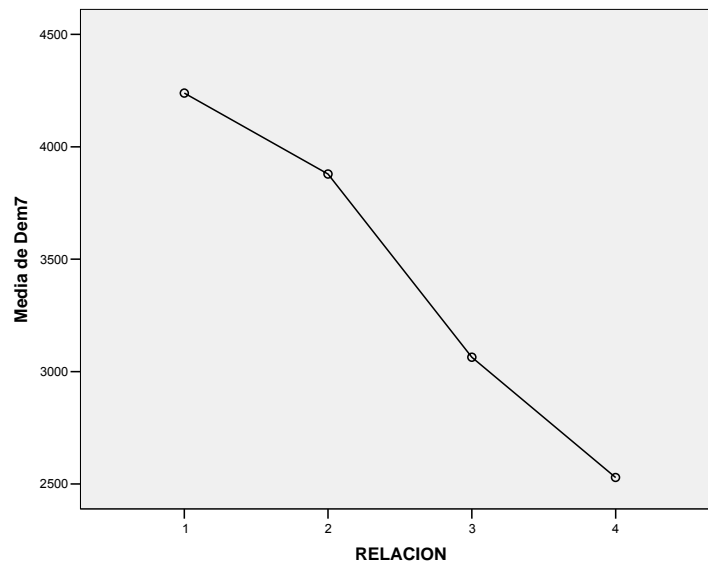
Fuente: SPSS

Figura 21. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica - *makespan*



Fuente: SPSS

Figura 22. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica - *makespan*



Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

En los siete niveles de la demanda básica los valores del *makespan* se comportan de la misma forma. En primer lugar, al utilizar un lote de transferencia igual al lote de proceso se genera el mayor valor del *makespan* dentro del nivel. Este disminuye cuando se toma un lote de transferencia igual al lote de proceso pero con *setup*. Un resultado menor que el anterior se logra cuando se trabaja con un lote de transferencia de la Mitad del lote de proceso. Finalmente se obtiene el valor de *makespan* más bajo cuando se pasa de una estación a otra una Unidad cada vez.

Al cambiar los niveles de demanda, dentro de la demanda básica, se observa la misma conducta en el patrón de los resultados obtenidos. El *makespan* más alto se consigue cuando se trabaja con un lote de transferencia igual al lote de proceso; su valor disminuye hasta que se consigue el mínimo, dentro del nivel de demanda, cuando se tiene un lote de transferencia de una Unidad.

Entonces, en la demanda básica, la configuración que más está retardando la salida de la última pieza del taller es la Relación 1, es decir, tomar el lote de transferencia igual al lote

de proceso. Mientras que aquella que está logrando acelerar el flujo de las piezas, que es lo mejor para el funcionamiento del taller, es la Relación 4, que equivale a tomar como tamaño del lote de transferencia una Unidad.

Makespan Demanda Básica X 10

Procedimiento General

El procedimiento es idéntico al presentado para la demanda básica.

- Se obtienen los estadísticos descriptivos para cada una de las cuatro poblaciones.
- Se grafican los datos obtenidos en cada nivel de demanda y se analiza el comportamiento de los resultados.

Resultados en SPSS

Estadísticos Descriptivos

Tabla 30. Estadísticos descriptivos para el *makespan* de la demanda básica X 10

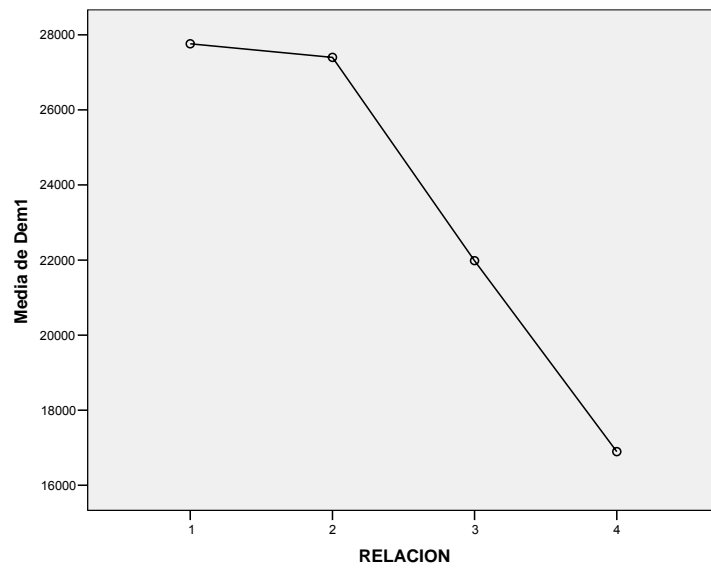
Descriptivos									
MAKESPAN									
	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo	
					Límite inferior	Límite superior			
1	7	44898,57	10991,346	4154,338	34733,27	55063,87	27760	63120	
2	7	44538,57	10991,346	4154,338	34373,27	54703,87	27400	62760	
3	7	31816,00	7691,350	2907,057	24702,69	38929,31	21983	46023	
4	7	23331,00	4236,116	1601,101	19413,25	27248,75	16898	30393	
Total	28	36146,04	12505,461	2363,310	31296,92	40995,15	16898	63120	

Fuente: SPSS

Gráfico de las medias

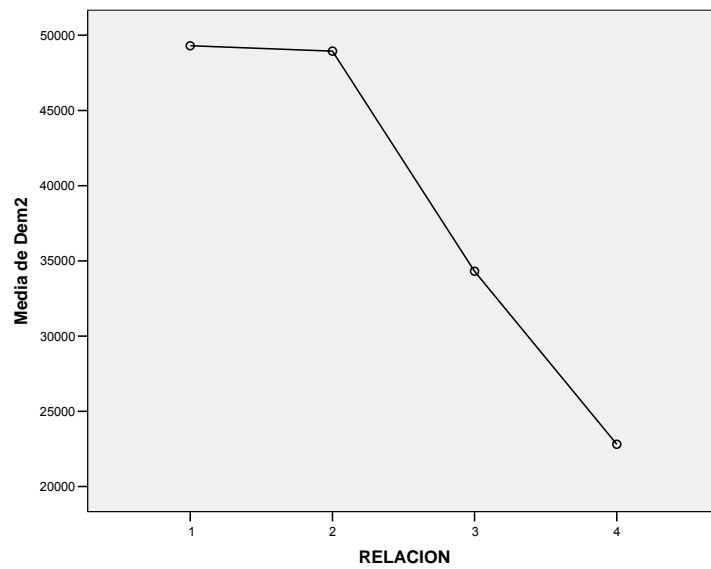
Se realiza con el objetivo de examinar el comportamiento de los cuatro tipos de Relación, con respecto al *makespan* alcanzado, en cada nivel de la demanda básica X 10.

Figura 23. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica X 10 - *makespan*



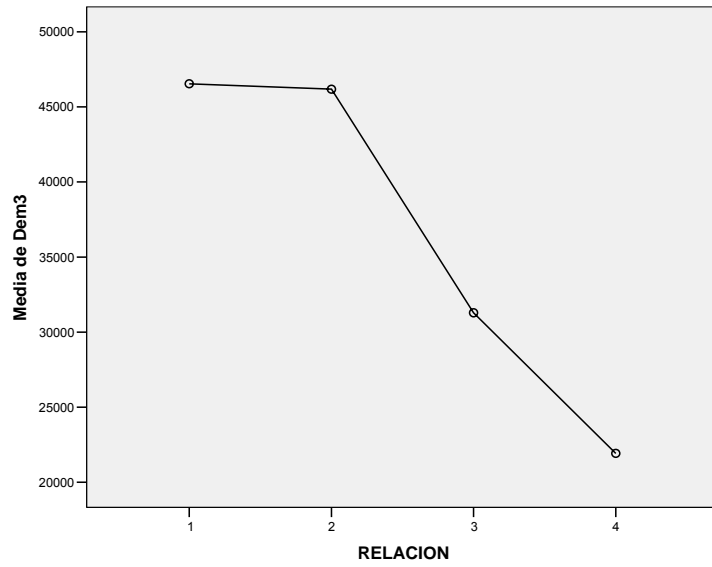
Fuente: SPSS

Figura 24. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica X 10 - *makespan*



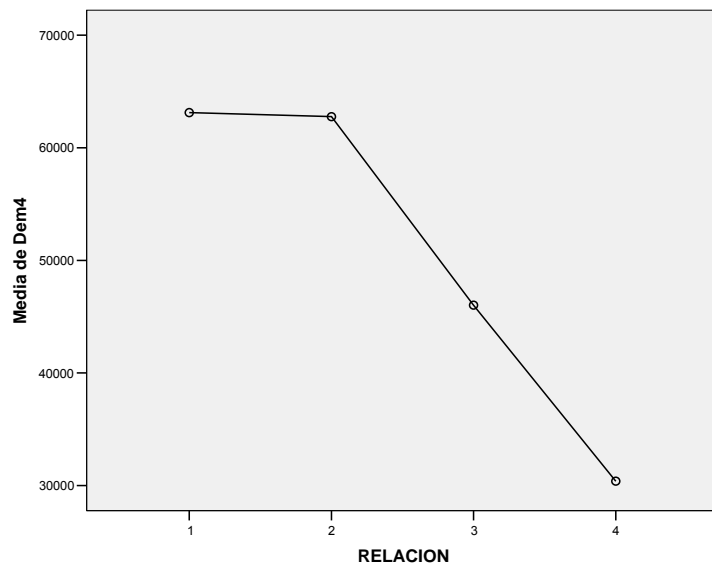
Fuente: SPSS

Figura 25. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica X 10 – *makespan*



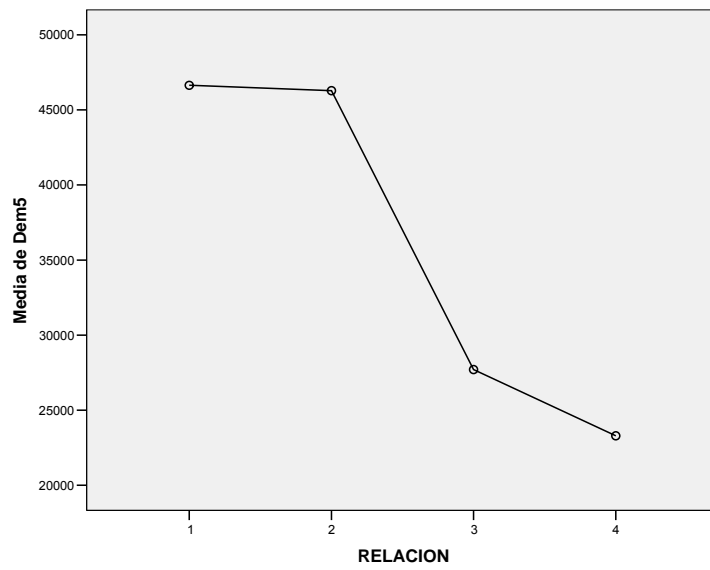
Fuente: SPSS

Figura 26. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica X 10 - *makespan*



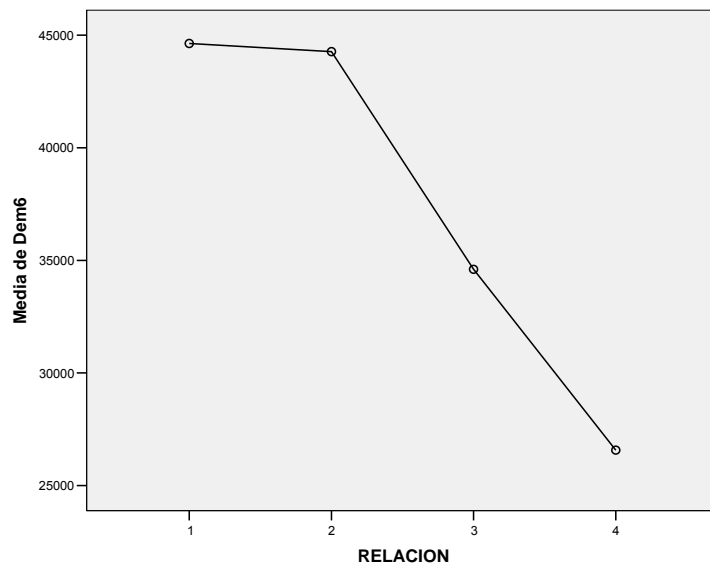
Fuente: SPSS

Figura 27. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica X 10 - *makespan*



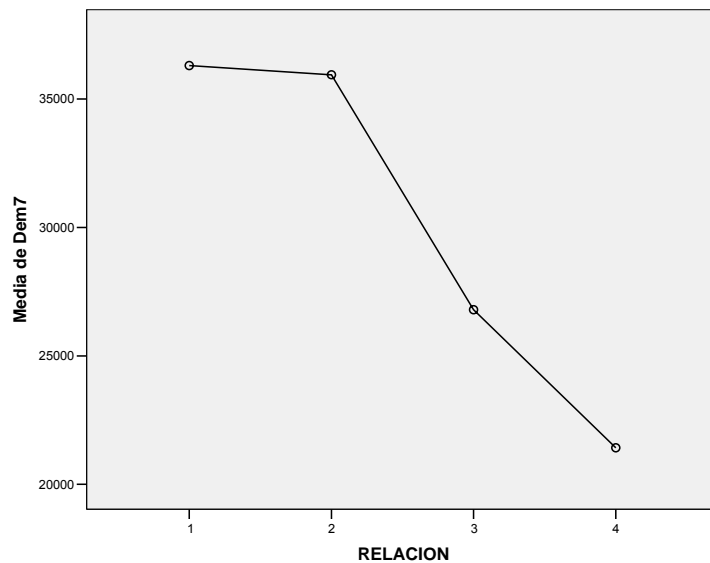
Fuente: SPSS

Figura 28. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica X 10 - *makespan*



Fuente: SPSS

Figura 29. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica X 10 - *makespan*



Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

Como en la demanda básica, los valores del *makespan* se comportan de la misma forma a lo largo de los siete niveles de demanda. Además, su conducta descendente es semejante a la que se observó en el caso anterior.

El *makespan* más alto dentro de cada nivel se alcanza cuando se toma el lote de transferencia igual al lote de proceso. Luego se produce una disminución cuando se trabaja el lote de transferencia igual al lote de proceso con *setup*. El valor del *makespan* se reduce nuevamente cuando se utiliza un lote de la Mitad del lote de proceso y finalmente llega a su mínimo cuando se tiene una Unidad como lote de transferencia.

La reducción observada entre la Relación 1 y la Relación 2 no es tan marcada como en la demanda básica, esto supone que en demandas grandes la reducción que se obtiene en el *makespan* por trabajar con tiempos de preparación anticipados no es tan considerable como en demandas pequeñas, sin embargo, este punto se analizará con más detalle en secciones posteriores.

Por lo tanto, en todos los niveles de la demanda básica X 10, al trabajar un lote de transferencia igual al lote de proceso se está retardando la salida de la última pieza del taller, mientras que al transferir entre estaciones las piezas de una en una, se está acelerando el flujo, es decir, se está llevando el *makespan* a su mínimo.

Conclusión General sobre los resultados en la Demanda Básica y la Demanda Básica X 10

En los dos casos analizados, se observa el mismo patrón de comportamiento para las cuatro configuraciones de lote de transferencia. La configuración que genera el menor *makespan*, en todos los casos, es transferir las piezas de una en una entre las estaciones de trabajo. En términos generales, al reducir el tamaño del lote de transferencia se observa cómo disminuye el *makespan* del sistema.

Además de lo anterior, se debe establecer qué tan significativa es la diferencia observada entre los resultados de los cuatro tipos de lote de transferencia. Este escenario se toma en cuenta en la segunda parte del análisis estadístico.

5.1.2 Análisis de varianza

El análisis de varianza es una técnica estadística que desarrolla un contraste sobre los valores esperados de ciertas muestras, sirve para determinar si las diferencias que existen entre éstos son estadísticamente significativas, y de esta forma, hacer inferencia sobre si las muestras comparadas provienen de poblaciones con la misma media.

Al comparar múltiples grupos de una variable, se evalúa la forma como contribuyen ciertas variables independientes en la variación de la media de una variable dependiente. Es una prueba de hipótesis en la cual se evalúa la hipótesis nula sobre la igualdad de las medias de los grupos que conforman la variable independiente.

En la Anova se divide la varianza de las muestras en dos componentes: la variación dentro de cada una y la variación entre ellas. La variabilidad entre grupos debe ser

significativamente grande con respecto a la variabilidad producida dentro de ellos, debido a la aleatoriedad, para establecer que las medias sí son estadísticamente distintas.

En este caso se trabaja un análisis de varianza de un solo factor, con el *makespan* como variable dependiente y con cuatro poblaciones como variables independientes. Se hace con el propósito de verificar si hay evidencia para decir que existe una diferencia significativa entre las medias de los cuatro tipos de lote de transferencia.

Makespan Demanda Básica

Procedimiento General

- Para la aplicación de la Anova es necesario primero probar las asunciones de normalidad, homocedasticidad y aleatoriedad. Para las dos primeras, se aplican las pruebas de *Komogorov-Smirnov* y de *Levene* respectivamente; ambas generan un estadístico para aceptar o rechazar las hipótesis de normalidad y de igualdad de varianzas, según sea el caso.

Como se explicó anteriormente, la aleatoriedad se tuvo en cuenta cuando se corrieron los modelos en Gams para dar solución a cada uno de los casos.

- Una vez sean demostradas las asunciones mencionadas, se aplica el análisis de varianza a los cuatro grupos de la variable dependiente. La Anova establece si las medias poblacionales son estadísticamente iguales.

La hipótesis nula puede o no rechazarse. En el primer evento, no se pueden considerar similares las medias, es decir, las poblaciones definidas por la Relación no poseen el mismo *makespan* promedio. Por lo tanto, habría evidencia estadística para decir que trabajar con los cuatro tipos de tamaños de lote de transferencia es diferente en términos de la medida de eficacia alcanzada. Para el segundo, no existiría diferencia en el *makespan* obtenido para cada uno de los cuatro tipos de Relación; por lo que podría concluirse que utilizar lotes de transferencia de tamaño igual al lote de proceso, o a medio lote de proceso, o a una unidad, es igual con relación a la medida de eficacia obtenida.

- Si es comprobada la diferencia general de medias, luego es necesario descubrir cuáles de ellas son diferentes entre sí. Esto se logra con la aplicación de una prueba de comparación de medias *a posteriori*. La prueba utilizada es la HSD de Tukey, ésta define entre cuáles de las medias hay, o no, una diferencia significativa.

Resultados en SPSS

Prueba de Normalidad

H₀: La distribución observada para el *makespan*, en cada una de las poblaciones, se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

H₁: La distribución observada para el *makespan*, en cada una de las poblaciones, no se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

Tabla 31. Prueba de normalidad para el *makespan* de la demanda básica

RELACION		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MAKESPAN	1	,222	7	,200*	,952	7	,743
	2	,222	7	,200*	,952	7	,743
	3	,200	7	,200*	,962	7	,838
	4	,178	7	,200*	,954	7	,767

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

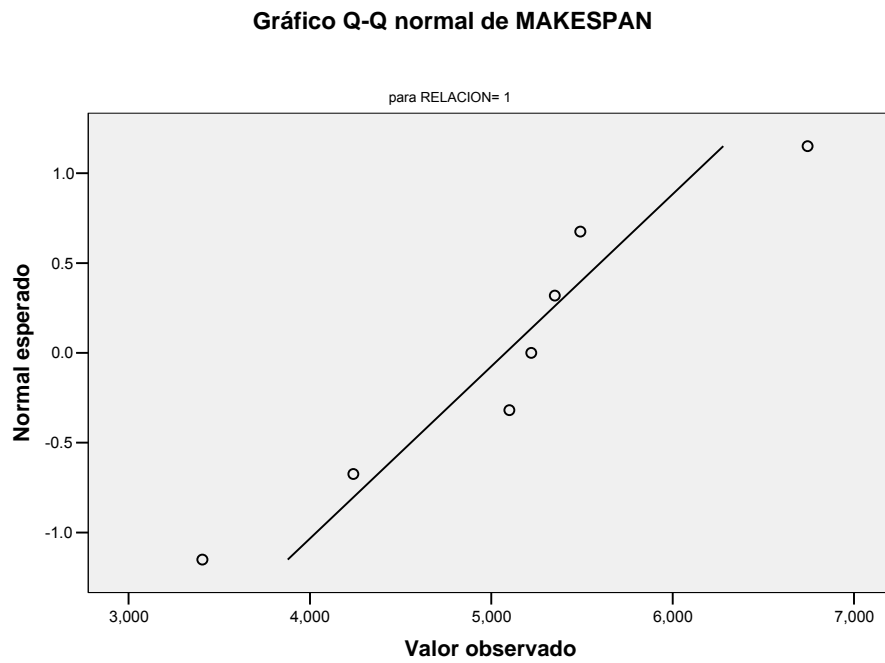
a. Corrección de la significación de Lilliefors

Fuente: SPSS

Según el valor de la significancia (0.200) se puede establecer que no hay evidencia suficiente estadística para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto se toma como válida la asunción de normalidad para los datos del *makespan* de la demanda básica.

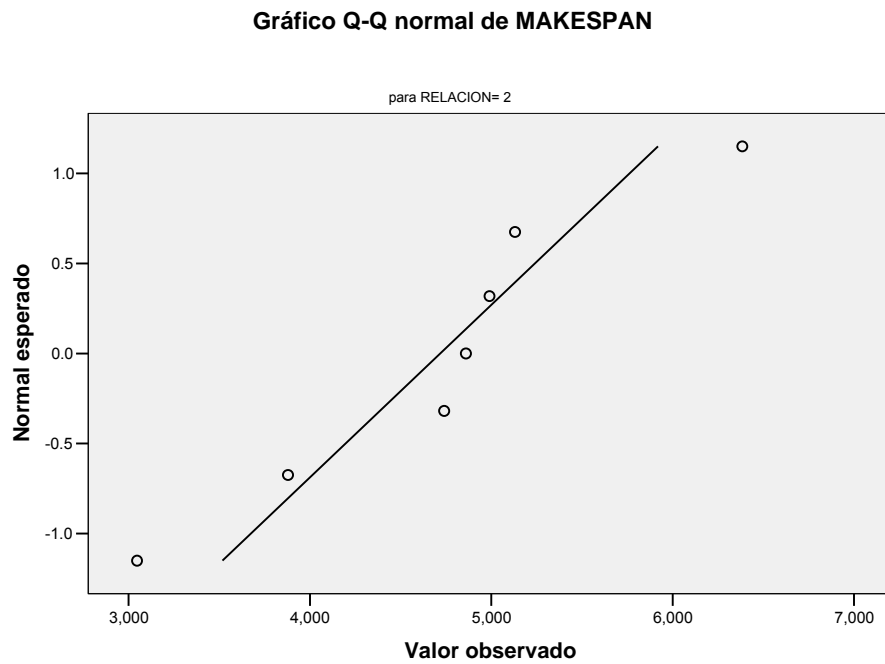
Gráficamente también se evidencia el comportamiento normal de los datos en los cuatro grupos.

Figura 30. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 1



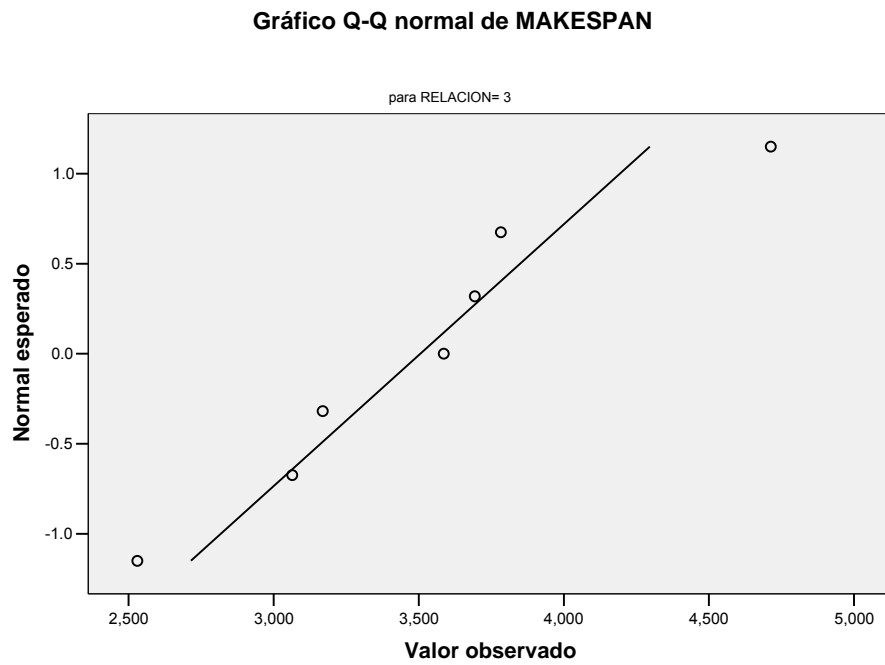
Fuente: SPSS

Figura 31. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 2



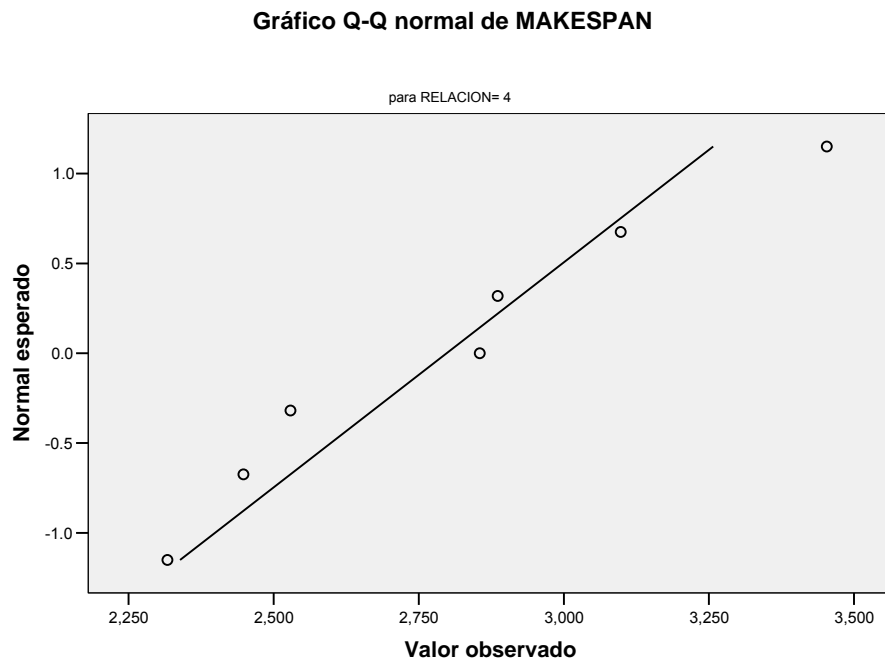
Fuente: SPSS

Figura 32. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 3



Fuente: SPSS

Figura 33. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 4



Fuente: SPSS

Prueba de Homocedasticidad

$$H_0 : \sigma_i^2 = \sigma_j^2$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$$

Tabla 32. Prueba de homogeneidad de varianzas para el *makespan* de la demanda básica

Prueba de homogeneidad de varianzas

MAKESPAN			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,881	3	24	,465

Fuente: SPSS

El valor de la significancia para esta prueba (0.465) muestra que no existe una diferencia significativa entre las varianzas de las cuatro poblaciones. Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95% se puede establecer que hay poca evidencia en contra de la hipótesis nula, y que por lo tanto no puede rechazarse.

Se considera válida la asunción de igualdad de varianzas entre los grupos del tipo de tamaño de lote de transferencia en la demanda básica.

Análisis de Varianza

Una vez comprobados los supuestos de normalidad y homocedasticidad se procede a realizar el análisis de varianza

Las hipótesis nula y alternativa para el análisis de varianza son:

$$H_0 : \mu_i = \mu_j$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$$

Tabla 33. Anova para las medias del *makespan* de la demanda básica

ANOVA

MAKESPAN

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	23569256	3	7856418,7	11,179	,000
Intra-grupos	16866525	24	702771,857		
Total	40435781	27			

Fuente: SPSS

Prueba de Comparación de Medias *a posteriori*

Tabla 34. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del *makespan* de la demanda básica

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: MAKESPAN

HSD de Tukey

(I) RELACION	(J) RELACION	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	360,000	448,098	,852	-876,13	1596,13
	3	1573,286*	448,098	,009	337,16	2809,41
	4	2280,714*	448,098	,000	1044,59	3516,84
2	1	-360,000	448,098	,852	-1596,13	876,13
	3	1213,286	448,098	,056	-22,84	2449,41
	4	1920,714*	448,098	,001	684,59	3156,84
3	1	-1573,286*	448,098	,009	-2809,41	-337,16
	2	-1213,286	448,098	,056	-2449,41	22,84
	4	707,429	448,098	,409	-528,70	1943,56
4	1	-2280,714*	448,098	,000	-3516,84	-1044,59
	2	-1920,714*	448,098	,001	-3156,84	-684,59
	3	-707,429	448,098	,409	-1943,56	528,70

*. La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

Análisis de Varianza

La significancia de la prueba (0.000) muestra que su valor es menor que 0.05, por lo que hay una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula, lo que quiere decir que se rechaza la igualdad de las medias de los cuatro tipos de Relación.

Lo anterior puede entenderse como que existe evidencia para establecer que hay una diferencia significativa entre las medias de los cuatro tipos de lote de transferencia, es decir, que trabajar con cada uno de estos lotes sí genera un impacto diferente en el *makespan* obtenido.

Aunque la Anova muestra una diferencia entre los valores de *makespan* promedio, hay que descubrir cuáles de estas medias son efectivamente distintas, es decir, entre cuáles de ellas hay una diferencia significativa. Para esto se aplica una prueba de comparación de medias *a posteriori* que permita identificar cuáles tamaños de lote de transferencia son los que producen un impacto distinto en el *makespan*.

Prueba de Comparación de Medias *a posteriori*

Analizando la tabla de comparaciones múltiples se establece que entre la media 1 y las medias 3 y 4 hay diferencias significativas. Es decir, que al trabajar con un lote de transferencia igual a una Unidad y luego utilizar lotes iguales a los de proceso con o sin *setup*, o viceversa, las distancias que aparecen entre los valores promedio del *makespan* son considerables.

Las otras medias que también son diferentes son las de la Relación 2 y la Relación 4. Entonces, trabajar con un lote de transferencia igual al lote de proceso y luego emplear uno igual a Medio lote de proceso es diferente en términos estadísticos.

Según esto, las reducciones que se alcanzan, en la demanda básica, cuando se pasa de un lote de transferencia igual al lote de proceso a trabajar lotes de Medio lote de proceso

y de una Unidad, o cuando se pasa de lotes iguales a los de proceso con *setup* a una Unidad, sí son estadísticamente distintas, por lo que se justifica reducir el tamaño del lote de transferencia, en estos casos, cuando se desea alcanzar tiempos de suministro más cortos.

Sin embargo, no se perciben diferencias entre las medias de las Relaciones 1-2, 2-3 y 3-4. Por lo que modificar los tamaños de lote entre estas configuraciones no genera impactos significativos en la reducción del *makespan*.

Las semejanzas y diferencias anteriores crean los siguientes tres subconjuntos homogéneos de medias:

Tabla 35. Subconjuntos homogéneos para las medias del *makespan* de la demanda básica

MAKESPAN

HSD de Tukey^a

RELACION	N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	2	3
4	7	2798,00		
3	7	3505,43	3505,43	
2	7		4718,71	4718,71
1	7			5078,71
Sig.		,409	,056	,852

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 7,000.

Fuente: SPSS

Makespan Demanda Básica X 10

Procedimiento General

El procedimiento es igual al presentado para la demanda básica.

- Probar las asunciones de normalidad, homocedasticidad y aleatoriedad.
- Aplicar el análisis de varianza a los cuatro grupos de la variable dependiente.

- Emplear la prueba de comparación de medias *a posteriori*.

Resultados en SPSS

Prueba de Normalidad

H₀: La distribución observada para el *makespan*, en cada una de las poblaciones, se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

H₁: La distribución observada para el *makespan*, en cada una de las poblaciones, no se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

Tabla 36. Prueba de normalidad para el *makespan* de la demanda básica X 10

RELACION		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MAKESPAN	1	,205	7	,200*	,951	7	,739
	2	,205	7	,200*	,951	7	,739
	3	,216	7	,200*	,941	7	,651
	4	,218	7	,200*	,959	7	,813

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

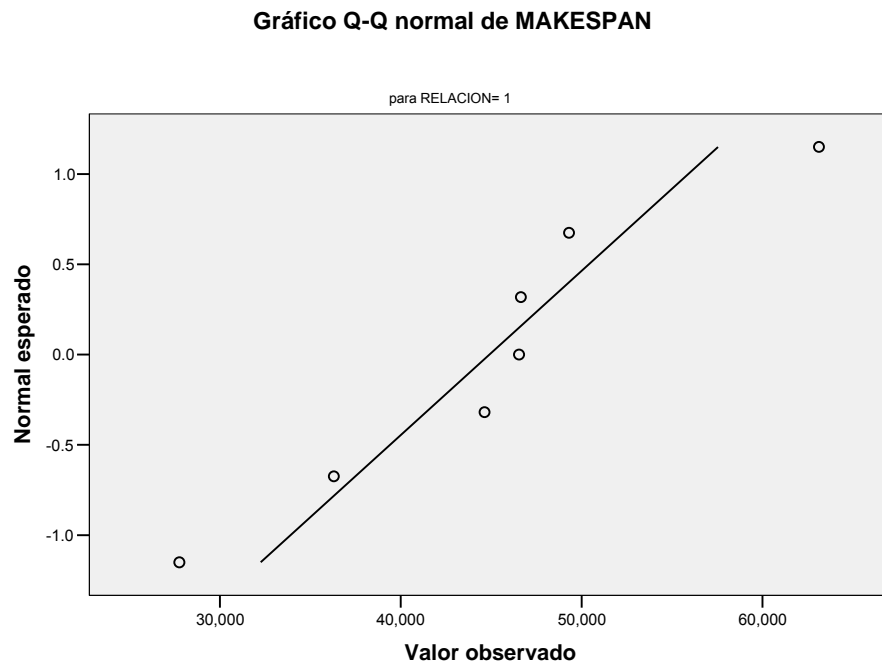
a. Corrección de la significación de Lilliefors

Fuente: SPSS

El valor de la significancia (0.200) indica que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula. En este caso se admite que los datos del *makespan* en cada población se comportan de acuerdo a una distribución normal.

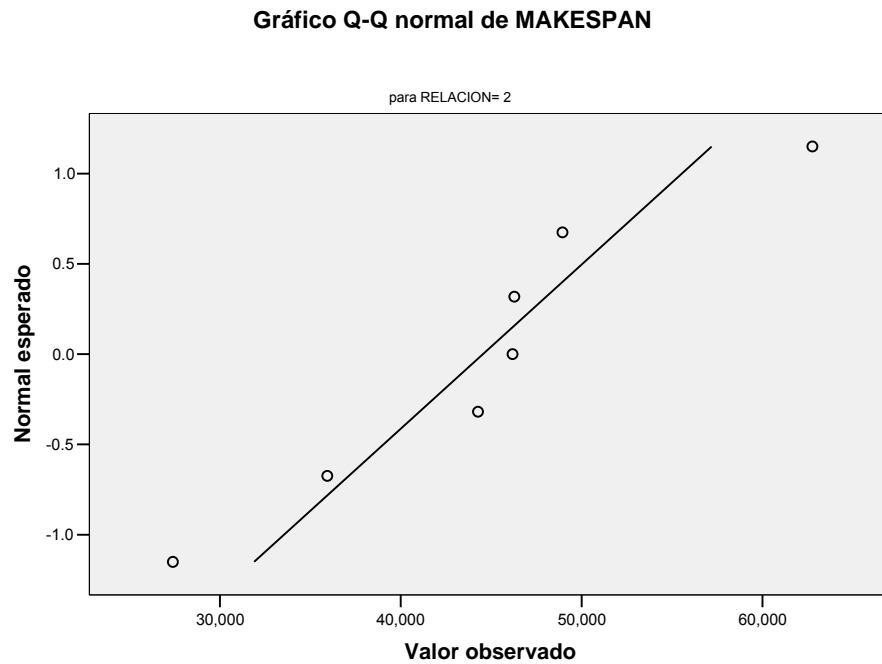
Gráficamente también se evidencia el comportamiento normal de los datos.

Figura 34. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 1 – Demanda Básica X 10



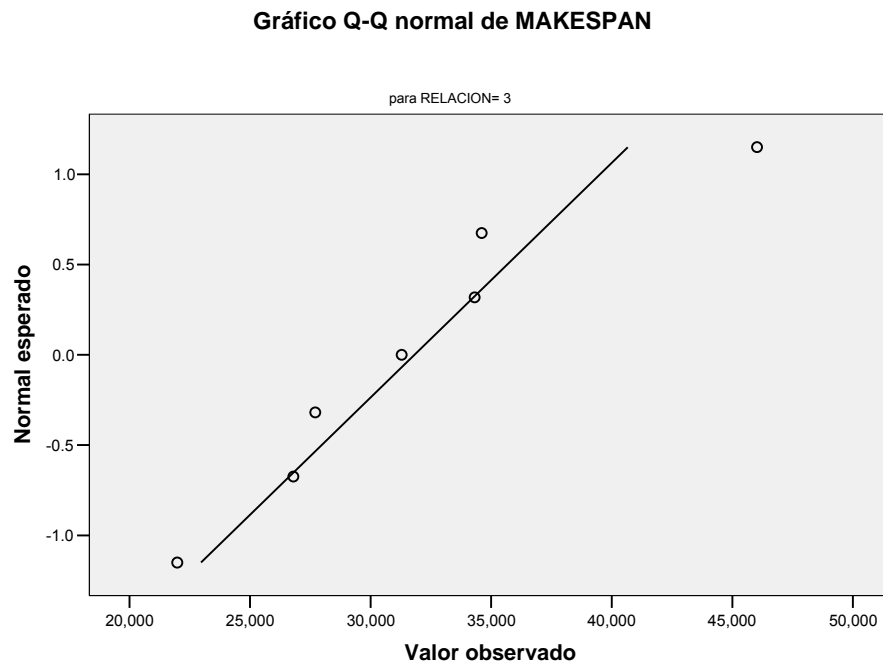
Fuente: SPSS

Figura 35. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 2 – Demanda Básica X 10



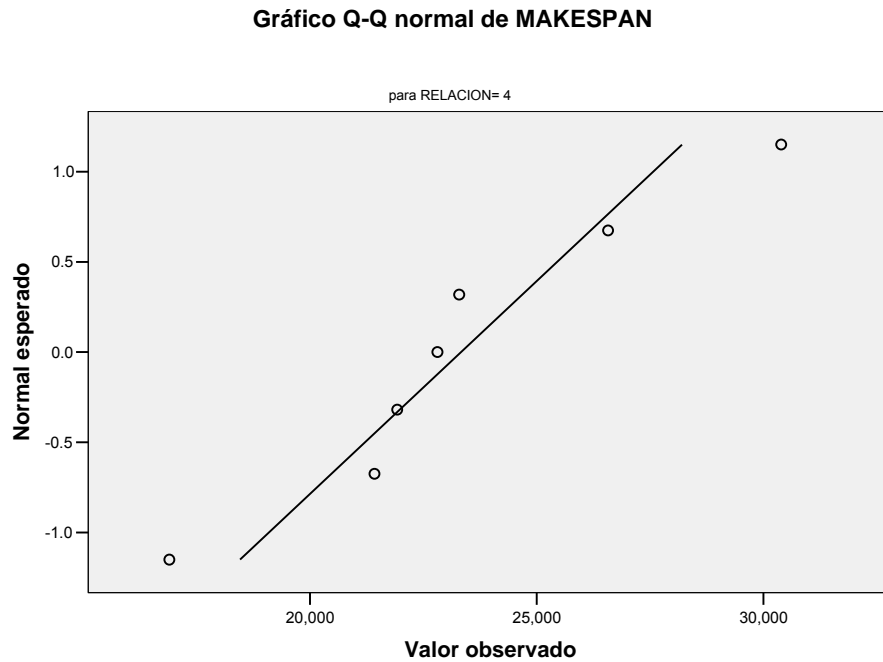
Fuente: SPSS

Figura 36. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 3 – Demanda Básica X 10



Fuente: SPSS

Figura 37. Gráfico de normalidad para el *makespan* en la Relación 4 – Demanda Básica X 10



Fuente: SPSS

Prueba de Homocedasticidad

$$H_0 : \sigma_i^2 = \sigma_j^2$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$$

Tabla 37. Prueba de homogeneidad de varianzas para el *makespan* de la demanda básica X 10

Prueba de homogeneidad de varianzas

MAKESPAN			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,878	3	24	,466

Fuente: SPSS

El valor de la significancia que arroja esta prueba (0.466) es mayor que 0.05, por lo tanto no existe una diferencia significativa entre las varianzas de las cuatro poblaciones. Se puede decir, entonces, que con un nivel de confianza del 95% no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas.

Análisis de Varianza

Una vez comprobados los supuestos de normalidad y homocedasticidad se procede a realizar el análisis de varianza.

Las hipótesis nula y alternativa para el análisis de varianza son:

$$H_0 : \mu_i = \mu_j$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$$

Tabla 38. Anova para las medias del *makespan* de la demanda básica X 10

ANOVA

MAKESPAN					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2,31E+009	3	7,7E+008	9,664	,000
Intra-grupos	1,91E+009	24	79680228		
Total	4,22E+009	27			

Fuente: SPSS

Prueba de Comparación de Medias *a posteriori*

Tabla 39. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del *makespan* de la demanda básica X 10

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: MAKESPAN

HSD de Tukey

(I) RELACION	(J) RELACION	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	360,000	4771,350	1,000	-12802,29	13522,29
	3	13082,571	4771,350	,052	-79,72	26244,86
	4	21567,571*	4771,350	,001	8405,28	34729,86
2	1	-360,000	4771,350	1,000	-13522,29	12802,29
	3	12722,571	4771,350	,061	-439,72	25884,86
	4	21207,571*	4771,350	,001	8045,28	34369,86
3	1	-13082,571	4771,350	,052	-26244,86	79,72
	2	-12722,571	4771,350	,061	-25884,86	439,72
	4	8485,000	4771,350	,308	-4677,29	21647,29
4	1	-21567,571*	4771,350	,001	-34729,86	-8405,28
	2	-21207,571*	4771,350	,001	-34369,86	-8045,28
	3	-8485,000	4771,350	,308	-21647,29	4677,29

*. La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

Análisis de Varianza

Se observa que la significancia de la prueba (0.000) muestra un valor menor que 0.05, por lo que hay una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula, por lo que, se rechaza la igualdad de medias. Entonces en la demanda básica X 10, no puede descartarse la idea de que los cuatro tipos de tamaño de lote muestren valores de *makespan* promedio distintos.

De lo anterior puede deducirse que existe evidencia para considerar que entre las medias de los cuatro tipos de lote de transferencia hay una diferencia significativa, es decir, que trabajar con cada uno de estos lotes sí genera un impacto diferente en el *makespan* obtenido.

Sin embargo, hay que descubrir cuáles de estas medias sí son distintas, es decir, entre cuáles de ellas hay una diferencia significativa. Para esto se aplica una prueba de comparación de medias *a posteriori* que permita identificar cuáles tamaños de lote de transferencia son los que producen un impacto distinto en el *makespan*.

Prueba de Comparación de Medias *a posteriori*

La tabla de comparaciones múltiples establece que entre la media 1 y la media 4 no hay una semejanza suficiente, para decir que son iguales en términos estadísticos. Es decir, que en la demanda básica X 10, al trabajar con un lote de transferencia igual a una Unidad y luego utilizar lotes iguales a los de proceso con o sin *setup*, o viceversa, la distancia que aparece entre los valores medios de *makespan* sí es significativa.

Como en el caso anterior, las otras medias que también son diferentes son las de la Relación 2 y la Relación 4. Entonces, trabajar con un lote de transferencia igual al lote de proceso y luego emplear uno igual a Medio lote de proceso es diferente en términos estadísticos.

Según esto, las reducciones que se alcanzan, en la demanda básica X 10, cuando se pasa de un lote de transferencia igual al lote de proceso a trabajar lotes de Medio lote de proceso y de una Unidad, sí son estadísticamente distintas, por lo que se justifica reducir el tamaño del lote de transferencia en estos casos cuando se desea alcanzar tiempos de suministro más cortos.

Por otra parte, no se perciben diferencias entre las medias de las Relaciones 1-2, 1-3, 2-3 y 3-4. Por lo que modificar los tamaños de lote entre estas configuraciones no genera impactos significativos en la reducción del *makespan*.

Las semejanzas y diferencias anteriores crean los dos siguientes subconjuntos homogéneos de medias:

Tabla 40. Subconjuntos homogéneos para las medias del *makespan* de la demanda básica X 10

MAKESPAN

HSD de Tukey^a

RELACION	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
4	7	23331,00	
3	7	31816,00	31816,00
2	7		44538,57
1	7		44898,57
Sig.		,308	,052

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 7,000.

Fuente: SPSS

Conclusión General sobre los resultados en la Demanda Básica y la Demanda Básica X 10

El análisis de varianza muestra que, en ambos casos, es mejor trabajar con lotes de transferencia de una unidad debido a que genera los menores valores en términos del *makespan*.

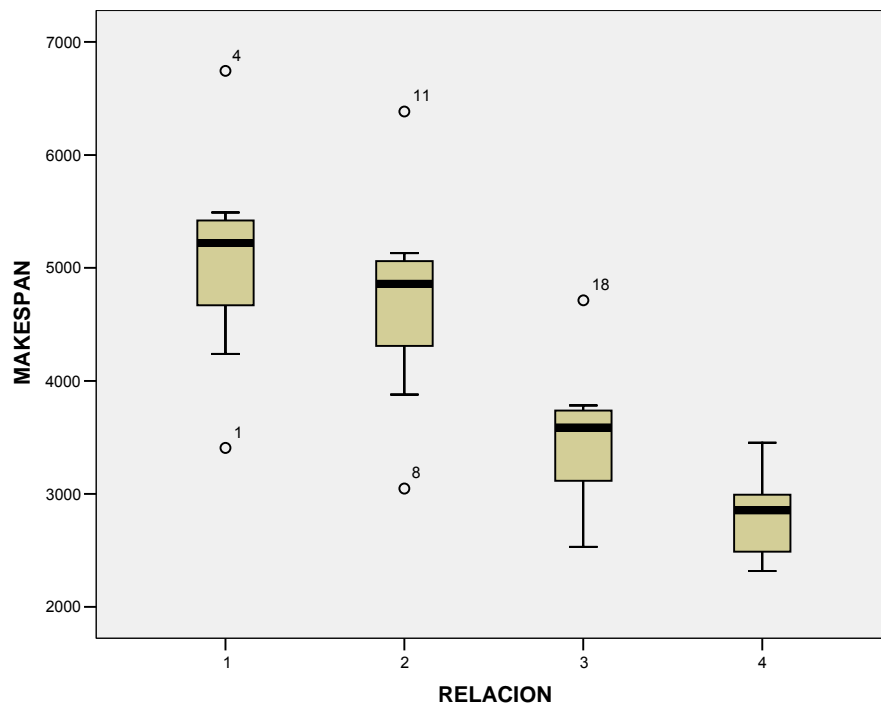
Según el modelo de la configuración productiva utilizada en la investigación, las reducciones obtenidas cuando se trabaja inicialmente con un lote de transferencia igual al lote de proceso con o sin *setup* y luego se transfiere de una estación a otra una unidad, sí son estadísticamente distintas. Por lo que en demandas pequeñas o grandes, se justifica modificar el tamaño del lote de transferencia en estos casos.

De lo anterior se deduce que es beneficioso para los sistemas productivos, que se adaptan a la configuración estudiada, realizar una programación de operaciones trabajando lotes de transferencia de una unidad cuando se busca obtener tiempos de suministros más cortos.

Por otra parte, analizando el valor del estadístico F, obtenido en la Anova para la demanda básica (11.179) y para la demanda básica X 10 (9.664), se observa que, debido a que el estadístico es más grande, en la demanda baja las diferencias que se evidenciaron entre las medias de los cuatro tamaños de lote de transferencia son mayores que en la demanda alta. Cuando la diferencia entre las medias es grande, la distancia entre los valores del *makespan* también aumenta. En un diagrama de caja se puede observar este comportamiento.

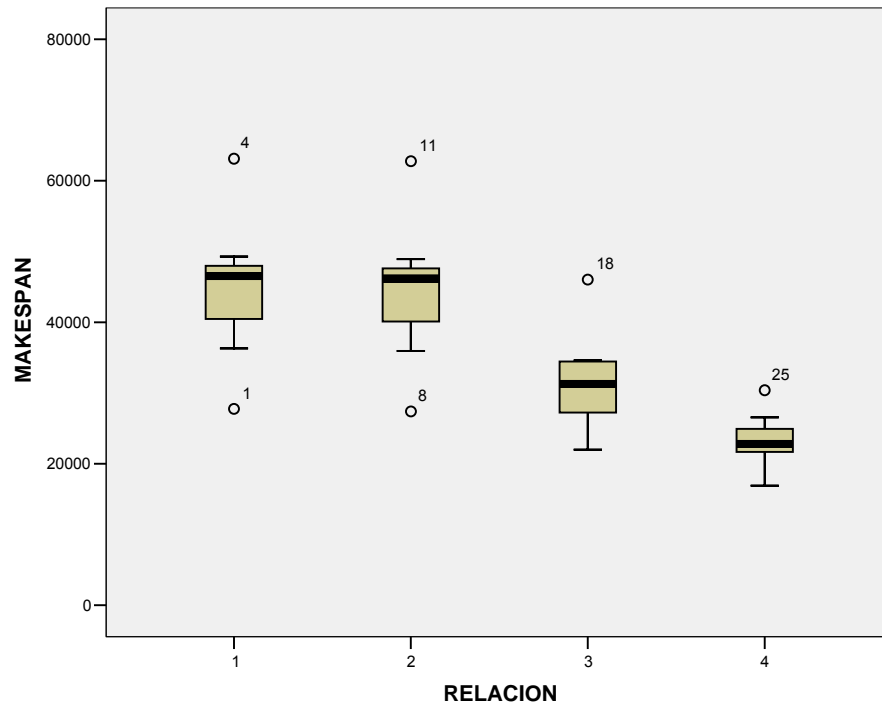
En las Figuras 38 y 39 se ve claramente cómo, por ejemplo, para la demanda básica las medias de la Relación 1 y de la Relación 2 están más alejadas entre sí que las mismas medias en la demanda básica X 10. Sucede lo mismo con las medias de la Relación 3 y la Relación 4, la distancia entre ellas se hace más evidente en la demanda básica que en la demanda básica X 10. Entonces, en la demanda básica las parejas de medias 1-2 y 3-4 son las que más aportan a la diferencia general de medias.

Figura 38. Diagrama de caja para los valores del *makespan* en la demanda básica



Fuente: SPSS

Figura 39. Diagrama de caja para los valores del *makespan* en la demanda básica X 10



Fuente: SPSS

El comportamiento anterior es una muestra del impacto que tiene el tiempo de preparación en los tiempos de procesamiento cuando se trabaja con demandas pequeñas. Debido a que el tiempo de preparación de máquinas es una fracción más grande del tiempo de procesamiento total cuando se están elaborando pocas piezas, entonces, al reducir el tamaño del lote de transferencia la disminución que se logra en el *makespan* está directamente relacionada con esta proporción. Es decir, cuánto más grande sea el tiempo de preparación con relación al tiempo total de procesamiento, más grande será la diferencia obtenida en las medias del *makespan* al reducir el tamaño del lote de transferencia entre un lote igual al lote de proceso y uno igual pero con *setup*.

Entender cómo influyen los tiempos de preparación en el *makespan* del sistema, al realizar la programación de operaciones, es fundamental para sacar conclusiones alrededor de los beneficios obtenidos cuando se trabajan los cuatro tipos de lote de transferencia en las demandas básica y básica X 10. Este análisis se desarrolla en la tercera parte del análisis estadístico.

5.1.3 Contrastes sobre medias

A diferencia de la Anova, la prueba de contraste de medias compara los valores promedio únicamente de dos muestras y establece si sus diferencias son significativas o no.

Este análisis tiene como objetivo examinar el impacto de los tiempos de preparación de máquinas en las reducciones que se alcanzan al modificar los tamaños del lote de transferencia y examinar cómo se comportan estas reducciones para establecer en dónde es más beneficioso utilizar un tipo de lote de transferencia en particular, si en demandas pequeñas o en demandas grandes.

Específicamente, se recurre a la prueba de contraste de medias para muestras independientes, en la cual se utiliza el estadístico T como parámetro de comparación en la evaluación de la evidencia que existe para rechazar o no la hipótesis nula.

Para la aplicación de esta prueba, se comparan las reducciones que se obtienen en el *makespan* por trabajar los distintos lotes de transferencia, es decir, se contrastan los beneficios que se alcanzan al modificar el tamaño del lote de transferencia. Estas reducciones se trabajan como porcentajes, analizando en cuánto se disminuye el valor de la medida de eficacia cuando se modifica el tamaño de lote de transferencia. Por lo tanto, se emplean las siguientes comparaciones:

Igual / Igual-setup	Reducción en el valor de la medida de eficacia al pasar de trabajar un lote de transferencia Igual al lote de proceso a un lote de transferencia Igual al lote de proceso con <i>setup</i> .
Igual / Medio	Reducción en el valor de la medida de eficacia al pasar de trabajar un lote de transferencia Igual al lote de proceso a un lote de transferencia igual a Medio lote de proceso.
Igual / Unidad	Reducción en el valor de la medida de eficacia al pasar de trabajar un lote de transferencia Igual al lote de proceso a un lote de transferencia igual a una Unidad.

Igual-setup / Unidad Reducción en el valor de la medida de eficacia al pasar de trabajar un lote de transferencia Igual al lote de proceso con *setup* a un lote de transferencia igual a una Unidad.

Igual-setup / Medio Reducción en el valor de la medida de eficacia al pasar de trabajar un lote de transferencia Igual al lote de proceso con *setup* a un lote de transferencia igual a Medio lote de proceso.

Medio / Unidad Reducción en el valor de la medida de eficacia al pasar de trabajar un lote de transferencia Igual a Medio lote de proceso a un lote de transferencia igual a una Unidad.

En la Tabla 41 se observa el resumen de las comparaciones que se realizan para la prueba de contraste de medias.

Tabla 41. Comparaciones para la prueba de contraste de medias

Comparaciones para la prueba de contraste de medias		Nombre en SPSS
Comparación 1	Igual / Igual-setup	Red.I.IS
Comparación 2	Igual / Medio	Red.I.M
Comparación 3	Igual / Unidad	Red.I.U
Comparación 4	Igual-setup / Unidad	Red.IS.U
Comparación 5	Igual-setup / Medio	Red.IS.M
Comparación 6	Medio / Unidad	Red.M.U

Fuente: autora del proyecto

Entonces, la prueba de contraste de medias se aplica a los resultados de los porcentajes de reducción del *makespan*, para las distintas comparaciones entre los cuatro tamaños de lote de transferencia, entre la demanda básica y de la demanda básica X 10. Por lo tanto se efectúan seis comparaciones así:

- Diferencia de medias de los porcentajes de reducción entre el lote Igual y el lote Igual – setup en la demanda básica y la demanda básica X 10

- Diferencia de medias de los porcentajes de reducción entre el lote Igual y el lote Medio en la demanda básica y la demanda básica X 10
- Diferencia de medias de los porcentajes de reducción entre el lote Igual y el lote Unidad en la demanda básica y la demanda básica X 10
- Diferencia de medias de los porcentajes de reducción entre el lote Igual – setup y el lote Unidad en la demanda básica y la demanda básica X 10
- Diferencia de medias de los porcentajes de reducción entre el lote Igual – setup y el lote Medio en la demanda básica y la demanda básica X 10
- Diferencia de medias de los porcentajes de reducción entre el lote Medio y el lote Unidad en la demanda básica y la demanda básica X 10

Procedimiento General

- Inicialmente se estudian los resultados para las cuatro configuraciones del factor Relación y se calculan los porcentajes de reducción entre ellos, tanto en la demanda básica como en la demanda básica X 10.
- Una vez se tenga la información necesaria, se aplica la prueba T para la diferencia de medias con los datos de las reducciones calculadas en la demanda básica y en la demanda básica X 10, y se analizan los resultados.

Resultados en SPSS

Antes de presentar los resultados de la prueba T efectuada en SPSS, se muestra en las Tablas 42, 43, 44 y 45 el cálculo de las reducciones para las distintas comparaciones.

A continuación se aplica la prueba de contraste de medias entre las reducciones calculadas de la demanda básica y la demanda básica X 10.

Tabla 42. Resultados del *makespan* en la demanda básica

	Nivel de Demanda						
LT / LP	1	2	3	4	5	6	7
Igual	3407	5491	5220	6744	5350	5100	4239
Igual - setup	3047	5131	4860	6384	4990	4740	3879
Medio	2530	3693	3586	4713	3169	3783	3064
Unidad	2317	2855	2448	3453	2886	3098	2529

Fuente: autora del proyecto

Tabla 43. Porcentajes de reducción del *makespan* en la demanda básica

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual / Igual-setup	10,57%	6,56%	6,90%	5,34%	6,73%	7,06%	8,49%
Igual / Medio	25,74%	32,74%	31,30%	30,12%	40,77%	25,82%	27,72%
Igual / Unidad	31,99%	48,01%	53,10%	48,80%	46,06%	39,25%	40,34%
Igual-setup / Unidad	23,96%	44,36%	49,63%	45,91%	42,16%	34,64%	34,80%
Igual-setup / Medio	16,97%	28,03%	26,21%	26,17%	36,49%	20,19%	21,01%
Medio / Unidad	8,42%	22,69%	31,73%	26,73%	8,93%	18,11%	17,46%

Fuente: autora del proyecto

Tabla 44. Resultados del *makespan* en la demanda básica X 10

	Nivel de Demanda						
LT / LP	1	2	3	4	5	6	7
Igual	27760	49300	46540	63120	46640	44630	36300
Igual - setup	27400	48940	46180	62760	46280	44270	35940
Medio	21983	34314	31288	46023	27703	34605	26796
Unidad	16898	22811	21925	30393	23292	26575	21423

Fuente: autora del proyecto

Tabla 45. Porcentajes de reducción del *makespan* en la demanda básica X 10

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual / Igual-setup	1,30%	0,73%	0,77%	0,57%	0,77%	0,81%	0,99%
Igual / Medio	20,81%	30,40%	32,77%	27,09%	40,60%	22,46%	26,18%
Igual / Unidad	39,13%	53,73%	52,89%	51,85%	50,06%	40,45%	40,98%
Igual-setup / Unidad	38,33%	53,39%	52,52%	51,57%	49,67%	39,97%	40,39%
Igual-setup / Medio	19,77%	29,89%	32,25%	26,67%	40,14%	21,83%	25,44%
Medio / Unidad	23,13%	33,52%	29,93%	33,96%	15,92%	23,20%	20,05%

Fuente: autora del proyecto

Inicialmente, SPSS muestran la media, la desviación y el error típico como estadísticos descriptivos de los porcentajes de reducción en cada comparación.

Tabla 46. Estadísticos descriptivos de los porcentajes de reducción – *makespan*

Estadísticos de grupo					
	Agrupar	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Red.I.IS	1	7	7,3786	1,68313	,63616
	2	7	,8486	,23427	,08854
Red.I.M	1	7	30,6014	5,22001	1,97298
	2	7	28,6157	6,72244	2,54084
Red.I.U	1	7	43,9357	7,14543	2,70072
	2	7	47,0129	6,50576	2,45895
Red.IS.U	1	7	39,3514	8,76971	3,31464
	2	7	46,5486	6,66048	2,51742
Red.IS.M	1	7	25,0100	6,42353	2,42787
	2	7	27,9986	6,86948	2,59642
Red.M.U	1	7	19,1529	8,67721	3,27968
	2	7	25,6729	6,92452	2,61722

Fuente: SPSS

Recordando que:

Red.I.IS: reducción al pasar de lote de transferencia Igual a Igual con *setup*.

Red.I.M: reducción al pasar de lote de transferencia Igual a Medio lote.

Red. I.U: reducción al pasar de lote de transferencia Igual a Unidad.

Red.IS.U: reducción al pasar de lote de transferencia Igual con *setup* a Unidad.

Red.IS.M: reducción al pasar de lote de transferencia Igual con *setup* a Medio lote.

Red.M.U: reducción al pasar de lote de transferencia de Medio lote a Unidad.

Prueba de Contraste de Medias

Las hipótesis nula y alternativa para el contraste de medias en cada una de las seis comparaciones para los datos de reducción del *makespan* son:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde μ_1 y μ_2 son las medias, en cada comparación, de la demanda básica y la demanda básica X 10 respectivamente.

Tabla 47. Prueba de contraste de medias para las reducciones del *makespan*

Prueba de muestras independientes

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
Red.I.IS	Se han asumido varianzas iguales	7,209	,020	10,167	12	,000	6,53000	,64229	5,13056	7,92944
	No se han asumido varianzas iguales			10,167	6,232				,000	6,53000
Red.I.M	Se han asumido varianzas iguales	,537	,478	,617	12	,549	1,98571	3,21691	-5,02334	8,99477
	No se han asumido varianzas iguales			,617	11,306				,549	1,98571
Red.I.U	Se han asumido varianzas iguales	,002	,961	-,842	12	,416	-3,07714	3,65244	-11,03512	4,88084
	No se han asumido varianzas iguales			-,842	11,896				,416	-3,07714
Red.IS.U	Se han asumido varianzas iguales	,363	,558	-1,729	12	,109	-7,19714	4,16224	-16,26589	1,87160
	No se han asumido varianzas iguales			-1,729	11,194				,111	-7,19714
Red.IS.M	Se han asumido varianzas iguales	,039	,846	-,841	12	,417	-2,98857	3,55470	-10,73361	4,75646
	No se han asumido varianzas iguales			-,841	11,946				,417	-2,98857
Red.M.U	Se han asumido varianzas iguales	,206	,658	-1,554	12	,146	-6,52000	4,19596	-15,66222	2,62222
	No se han asumido varianzas iguales			-1,554	11,437				,147	-6,52000

Fuente: SPSS

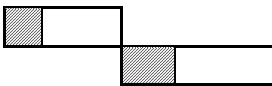
Análisis de Resultados

Los resultados de la prueba T para diferencia de medias se evalúan, en cada caso, si se ha aceptado o no la prueba de igualdad de varianzas que muestra el estadístico de Levene. Es decir, si el estadístico de Levene deja evidencia para establecer que entre las varianzas de las dos poblaciones no hay diferencias significativas, entonces se miran los resultados de la prueba T para la primera fila; si por el contrario, se concluye que las varianzas muestran diferencias claras entre ellas, entonces se toman los resultados de la prueba T para la segunda fila.

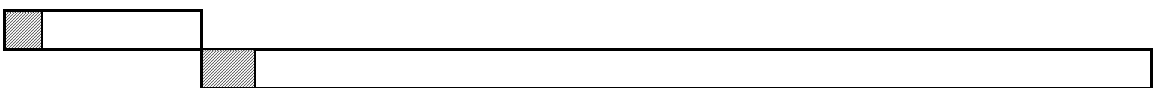
En el caso de la comparación I.IS, la significancia de la prueba de Levene (0.020) muestra una fuerte evidencia en contra de la hipótesis de igualdad de medias. Los resultados de este renglón para la prueba T muestran una significancia (0.000) menor que 0.05. Por lo tanto, aparece una evidencia fuerte en contra de la hipótesis de que las reducciones en la demanda básica y en la demanda básica X 10 son estadísticamente similares. Esto quiere decir que al pasar de trabajar con un lote de transferencia igual al lote de proceso a un lote igual al lote de proceso con *setup*, la reducción en el *makespan* varía si se emplea en demandas pequeñas o en demandas grandes. Lo anterior ocurre gracias a que la disminución que surge en el *makespan* en la demanda básica, se debe al impacto del tiempo de preparación cuando se procesan pocas piezas. Mientras que en la demanda básica X 10, este tiempo es consumido por el tiempo de procesamiento total.

En los siguientes gráficos se observa cómo el tiempo de preparación pierde influencia en el tiempo de procesamiento total cuando se aumenta el nivel de demanda:

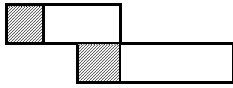
Relación Igual en demanda básica



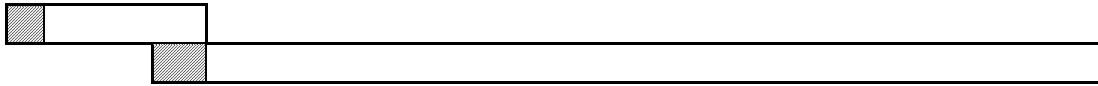
Relación Igual en demanda básica X 10



Relación Igual – setup en demanda básica



Relación Igual – setup en demanda básica X 10



Por lo tanto, cuando se quiera reducir los tiempos de suministro, cambiar el tamaño del lote de transferencia de uno Igual al lote de proceso a otro Igual con *setup* se recomienda en demandas pequeñas y no, cuando haya que producir grandes cantidades de piezas.

Para los demás casos hay poca evidencia en contra de las hipótesis de igualdad de varianzas y de medias:

Comparación I.M, significancia = 0.000

Comparación I.U, significancia = 0.549

Comparación IS.U, significancia = 0.109

Comparación IS.M, significancia = 0.417

Comparación M.U, significancia = 0.146

En todas estas comparaciones las medias en ambas demandas no difieren significativamente, es decir, el comportamiento de las reducciones en el *makespan* es similar tanto en la demanda básica como en la demanda básica X 10; no importa el número de trabajos que se estén procesando, las reducciones en los dos tipos de demanda son las mismas, por lo tanto, se están alcanzando beneficios similares aún cuando se procesa una gran cantidad de piezas.

Esto se debe primero a que el tiempo de preparación no es un factor diferenciador en estos cambios de lote de transferencia, como sí lo es en la comparación I.IS., aquí la reducción se ve influenciada en mayor medida por el número de piezas y no por la duración del alistamiento que requieran los recursos, y segundo se percibe cómo el tiempo de preparación es consumido por el tiempo total de procesamiento al trabajar con

demandas grandes. Se recomienda entonces, realizar estos cambios del tamaño de lote de transferencia tanto en demandas pequeñas como en demandas grandes.

Resumiendo el análisis anterior, en la Tabla 48 se muestra en qué tipo de demanda es recomendable utilizar los cambios de lote de transferencia, para cada comparación hecha, cuando se quiere reducir el *makespan* del sistema.

Tabla 48. Tipo de demanda recomendada para los cambios de lote de transferencia – *makespan*

Cambio del lote de transferencia	Se recomienda en:
Igual / Igual-setup	Demandas pequeñas
Igual / Medio	Demandas pequeñas y grandes
Igual / Unidad	Demandas pequeñas y grandes
Igual-setup / Unidad	Demandas pequeñas y grandes
Igual-setup / Medio	Demandas pequeñas y grandes
Medio / Unidad	Demandas pequeñas y grandes

Fuente: autora del proyecto

5.2 ANALISIS ESTADISTICO DE LA MEDIDA DE EFICACIA *FLOW TIME MEAN*

Al igual que para la medida de eficacia anterior, se utiliza SPSS como herramienta estadística para la realización de las pruebas necesarias en este proceso.

5.2.1 Análisis descriptivo

En este primer análisis, se evalúa el comportamiento del *flow time mean* a través de los grupos definidos por los cuatro tamaños de lote de transferencia. Se manejan los mismos tipos de Relación que fueron previamente fijados en la sección 5.1.1.

Flow time mean Demanda Básica

Procedimiento General

- Inicialmente se hallan los estadísticos descriptivos para cada una de las cuatro poblaciones.
- Se grafican los datos obtenidos y se analiza su comportamiento.

Resultados en SPSS

Estadísticos Descriptivos

Tabla 49. Estadísticos descriptivos para el *flow time mean* de la demanda básica

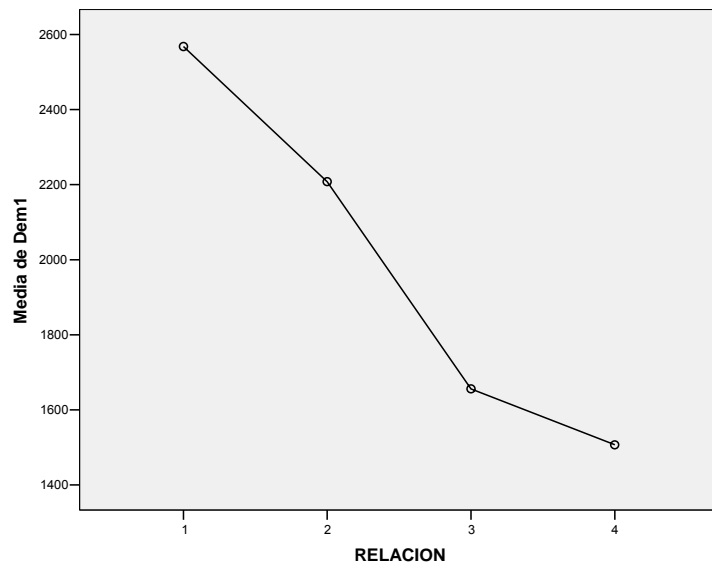
Descriptivos								
FLOW								
	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
1	7	3269,71	522,037	197,312	2786,91	3752,52	2568	4253
2	7	2913,29	523,630	197,913	2429,01	3397,56	2208	3900
3	7	1967,29	363,232	137,289	1631,35	2303,22	1598	2515
4	7	1652,14	208,908	78,960	1458,94	1845,35	1428	1979
Total	28	2450,61	784,734	148,301	2146,32	2754,90	1428	4253

Fuente: SPSS

Gráfico de las medias

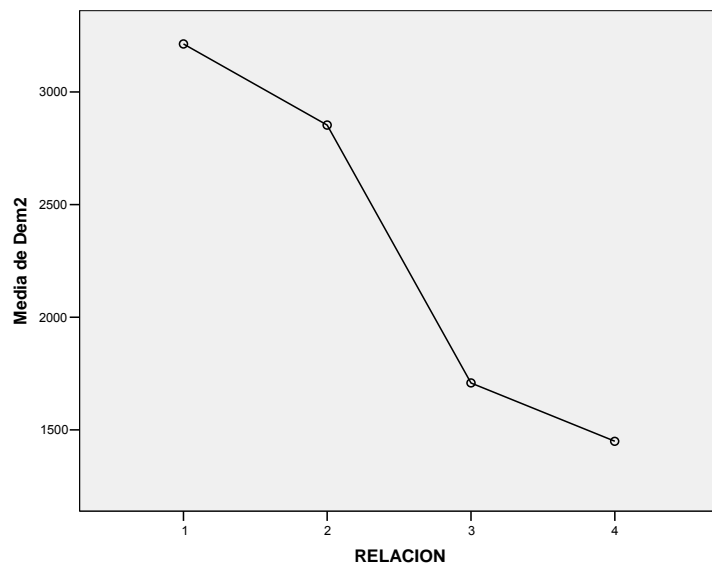
Se grafican los valores obtenidos para examinar el comportamiento del *flow time mean* en distintos escenarios.

Figura 40. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica – *flow time mean*



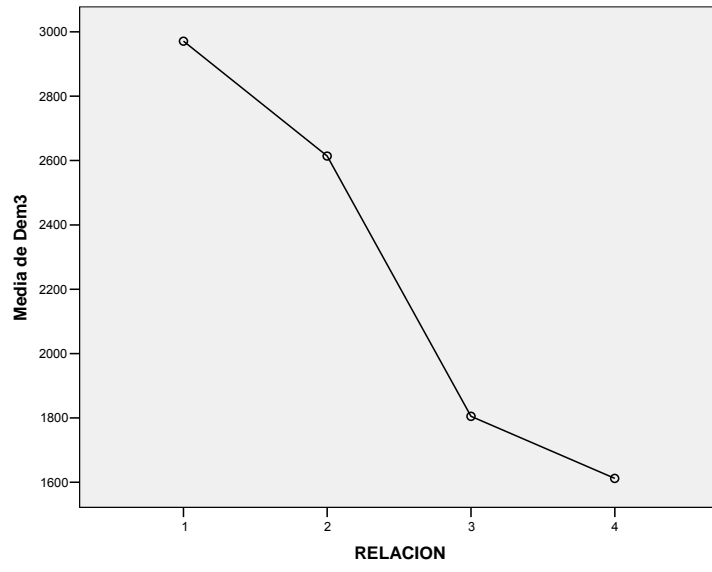
Fuente: SPSS

Figura 41. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica – *flow time mean*



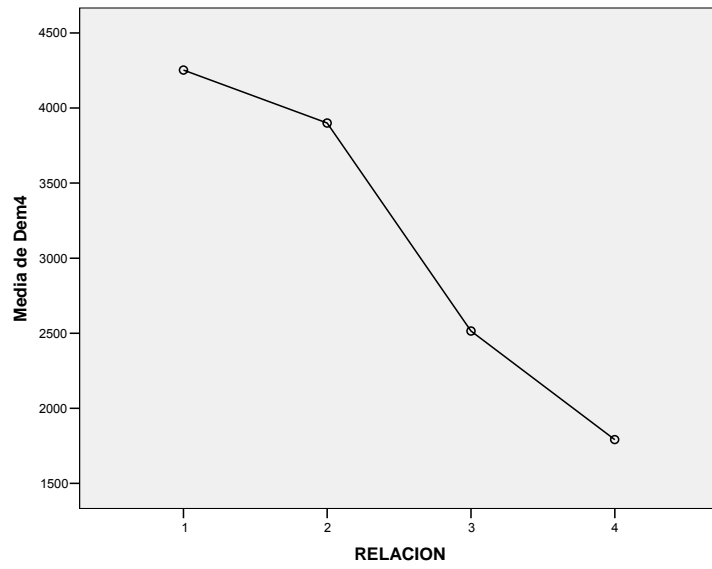
Fuente: SPSS

Figura 42. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica – *flow time mean*



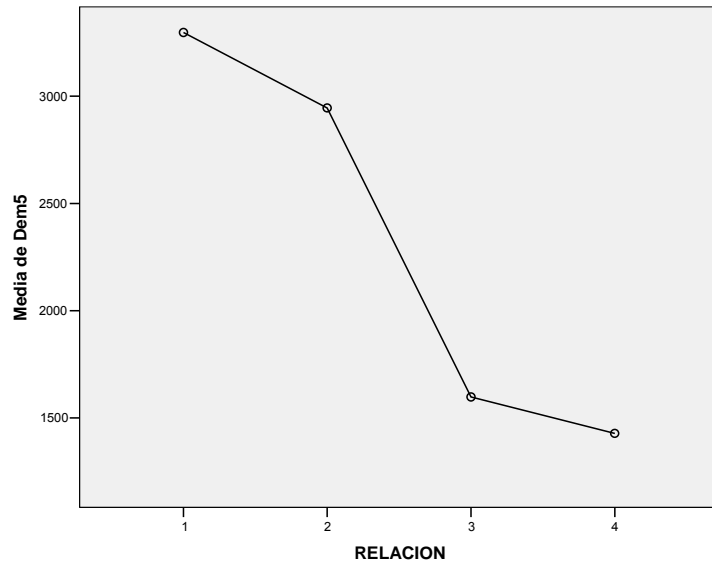
Fuente: SPSS

Figura 43. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica – *flow time mean*



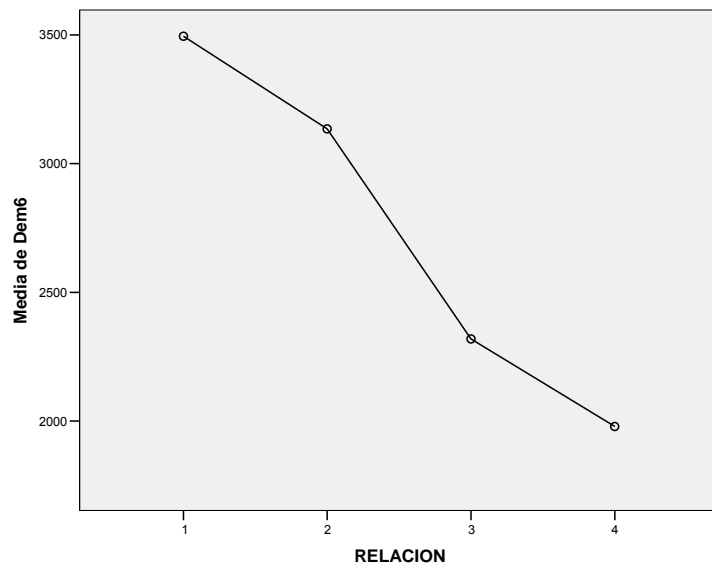
Fuente: SPSS

Figura 44. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica – *flow time mean*



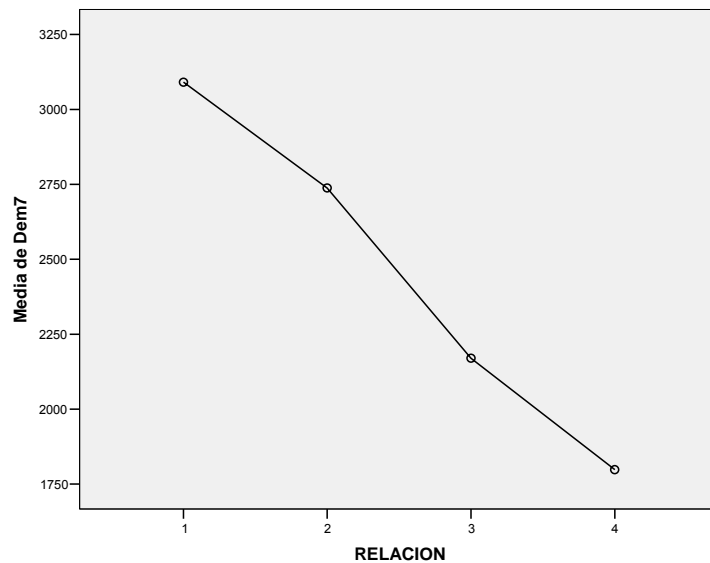
Fuente: SPSS

Figura 45. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica – *flow time mean*



Fuente: SPSS

Figura 46. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica – *flow time mean*



Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

Se observa el mismo comportamiento descendente en los valores del *flow time mean* a lo largo de los siete niveles de la demanda básica. Su valor máximo se está produciendo al trabajar lotes de transferencia de tamaño igual al lote de proceso. Una disminución se da cuando se pasa a utilizar lotes de transferencia igual al lote de proceso con *setup*. Otra reducción se alcanza si el lote de transferencia es igual a Medio lote de proceso y el valor más pequeño para esta medida de eficacia se logra cuando se toma como lote de transferencia una Unidad.

Según lo anterior, no importa el nivel de demanda básica, la configuración que más está aumentando el tiempo promedio que pasa en el sistema una tarea para ser procesada es la Relación 1, es decir, trabajar con el lote de transferencia igual al lote de proceso. Mientras que aquella que está alcanzando los valores mínimos para esta medida es la Relación 4.

Flow time mean Demanda Básica X 10

Procedimiento General

- Se obtienen los estadísticos descriptivos para cada una de las cuatro poblaciones.
- Se grafican los datos obtenidos en cada nivel de demanda y se analiza el comportamiento de los resultados.

Resultados en SPSS

Estadísticos Descriptivos

Tabla 50. Estadísticos descriptivos para el *flow time mean* de la demanda básica X 10

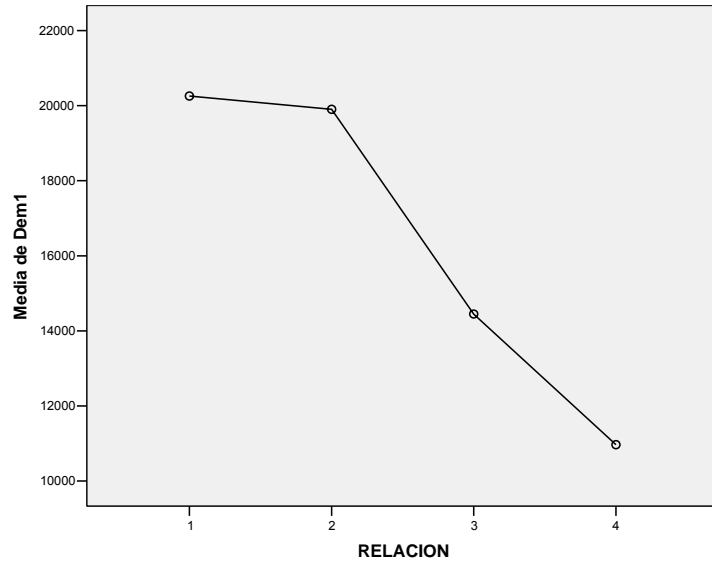
Descriptivos								
FLOW								
	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
1	7	26740,14	4920,570	1859,801	22189,37	31290,91	20256	35846
2	7	26385,71	4920,224	1859,670	21835,27	30936,16	19904	35494
3	7	17496,57	3286,071	1242,018	14457,46	20535,68	14395	22279
4	7	13418,57	2254,334	852,058	11333,66	15503,48	10969	16717
Total	28	21010,25	6959,547	1315,231	18311,62	23708,88	10969	35846

Fuente: SPSS

Gráfico de las medias

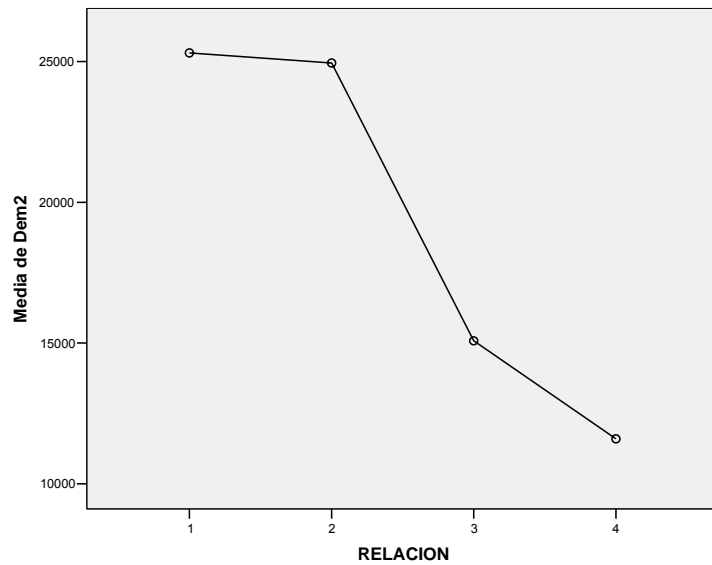
Se grafican los valores del *flow time mean* en los siete niveles de la demanda básica X 10.

Figura 47. Gráfico de medias del nivel 1 de la demanda básica X 10 – *flow time mean*



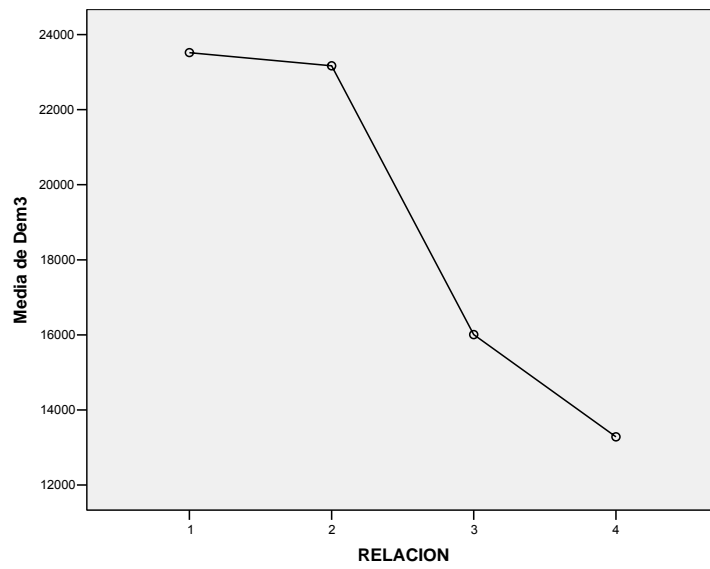
Fuente: SPSS

Figura 48. Gráfico de medias del nivel 2 de la demanda básica X 10 – *flow time mean*



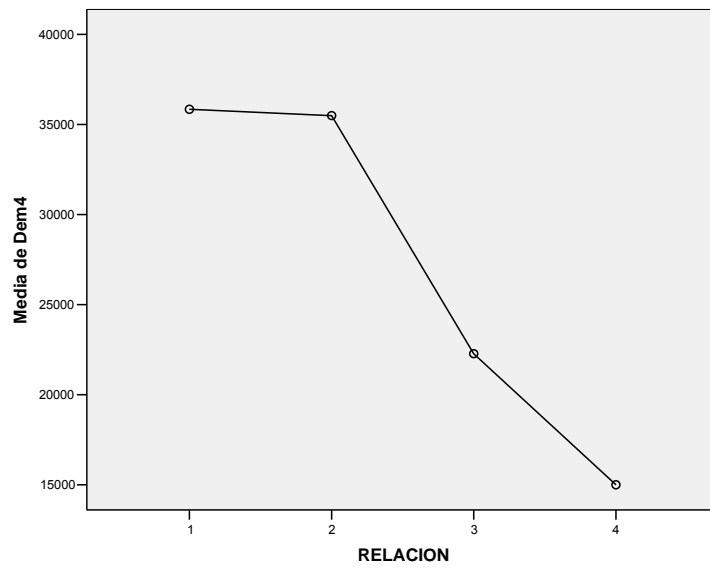
Fuente: SPSS

Figura 49. Gráfico de medias del nivel 3 de la demanda básica X 10 – *flow time mean*



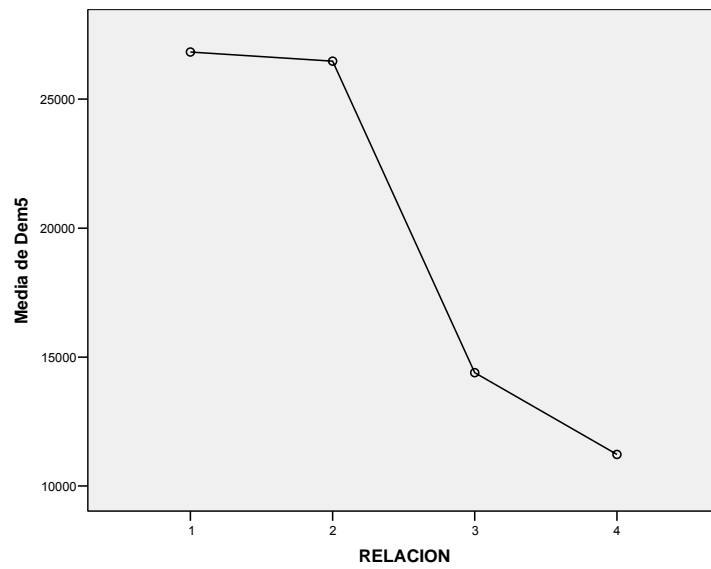
Fuente: SPSS

Figura 50. Gráfico de medias del nivel 4 de la demanda básica X 10 – *flow time mean*



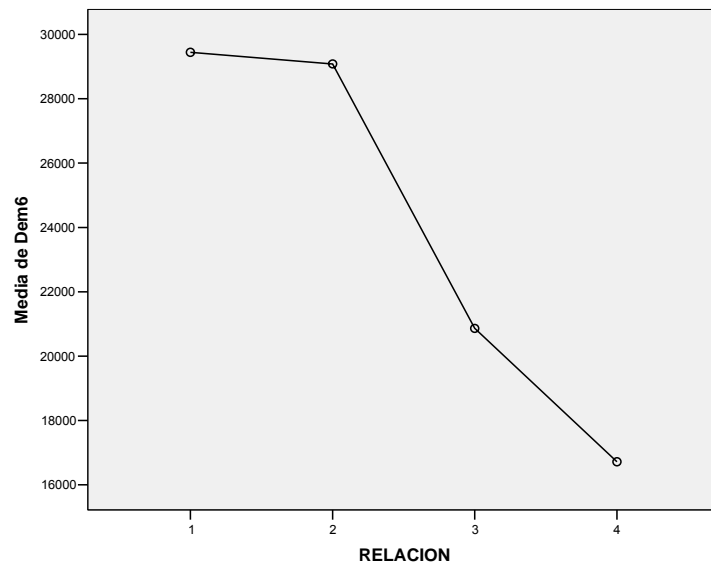
Fuente: SPSS

Figura 51. Gráfico de medias del nivel 5 de la demanda básica X 10 – *flow time mean*



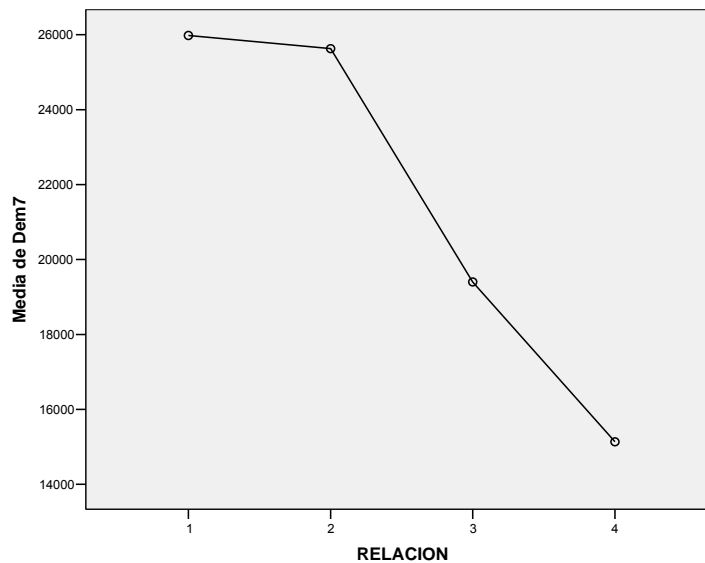
Fuente: SPSS

Figura 52. Gráfico de medias del nivel 6 de la demanda básica X 10 – *flow time mean*



Fuente: SPSS

Figura 53. Gráfico de medias del nivel 7 de la demanda básica X 10 – *flow time mean*



Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

Los valores del *flow time mean* se comportan de la misma forma a lo largo de los siete niveles de demanda. Además, su conducta descendente es semejante a la que se observó en el caso anterior.

Al utilizar un lote de transferencia igual al lote de proceso se genera el mayor valor del *flow time mean* dentro del nivel. Este disminuye cuando se toma un lote de transferencia igual al lote de proceso pero con *setup*; hay que resaltar que esta reducción no es tan marcada como la que se observó en la demanda básica, reflejo de la pérdida de importancia, en demandas grandes, de los tiempos de preparación. Un resultado menor que el anterior se logra cuando se trabaja con un lote de transferencia de la Mitad del lote de proceso. Finalmente se obtiene el valor de *flow time mean* más bajo cuando se pasa de una estación a otra una Unidad cada vez.

Entonces, en todos los niveles de la demanda básica X 10, al trabajar un lote de transferencia igual al lote de proceso se están alcanzando los mayores *flow time mean*, es

decir, cada tarea está pasando más tiempo en el sistema cuando se considera la Relación 1; por otra parte, al transferir entre estaciones las piezas de una en una, se están logrando los menores valores para esta medida de eficacia.

Conclusión General sobre los resultados en la Demanda Básica y la Demanda Básica X 10

Tanto en la demanda básica como en la demanda básica X 10 el comportamiento del *flow time mean*, según los cuatro tamaños de lote de transferencia, es similar. Por otra parte, las tareas pasan menos tiempo en el sistema cuando se transfieren de una en una las piezas entre las estaciones del taller.

A continuación se debe establecer qué tan significativa es la diferencia que se observa entre los valores de la medida de eficacia para las cuatro configuraciones de lote de transferencia.

5.2.2 Análisis de varianza

Flow time mean Demanda Básica

Procedimiento General

Este segundo análisis estadístico sigue el mismo esquema que el presentado para el análisis de varianza del *makespan*.

- Probar las tres asunciones: normalidad, homocedasticidad y aleatoriedad.
- Aplicación de la Anova a los cuatro grupos de la variable dependiente.
- Realización de la prueba de comparación de medias *a posteriori*.

Resultados en SPSS

Prueba de Normalidad

H₀: La distribución observada para el *flow time mean*, en cada una de las poblaciones, se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

H₁: La distribución observada para el *flow time mean*, en cada una de las poblaciones, no se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

Tabla 51. Prueba de normalidad para el *flow time mean* de la demanda básica

Pruebas de normalidad							
RELACION	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.	
FLOW 1	,193	7	,200*	,937	7	,612	
2	,193	7	,200*	,937	7	,609	
3	,244	7	,200*	,886	7	,255	
4	,185	7	,200*	,914	7	,427	

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

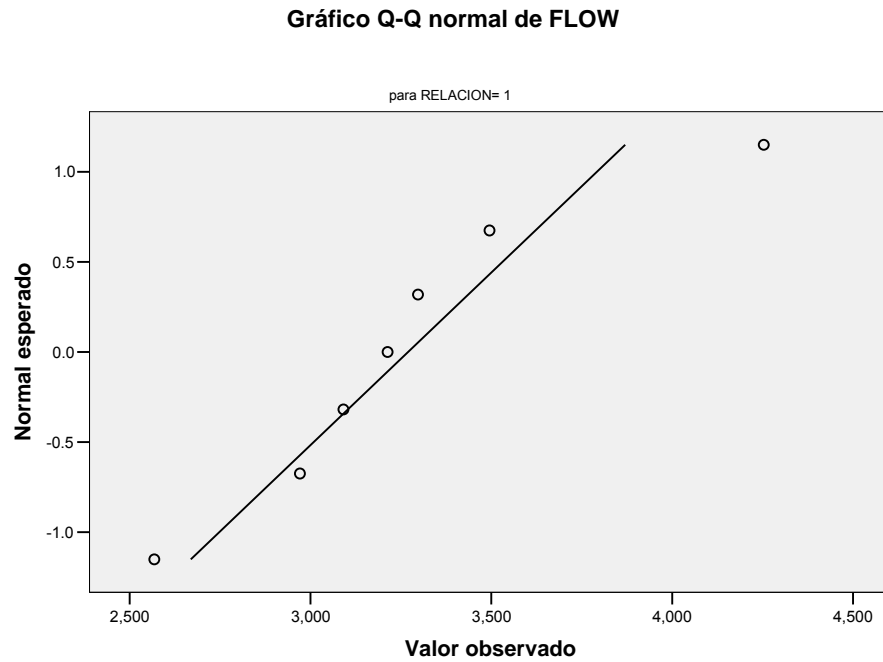
a. Corrección de la significación de Lilliefors

Fuente: SPSS

El valor de la significancia para la prueba (0.200) muestra que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula que establece que los datos del *flow time mean* en cada población se comportan de acuerdo a una distribución normal.

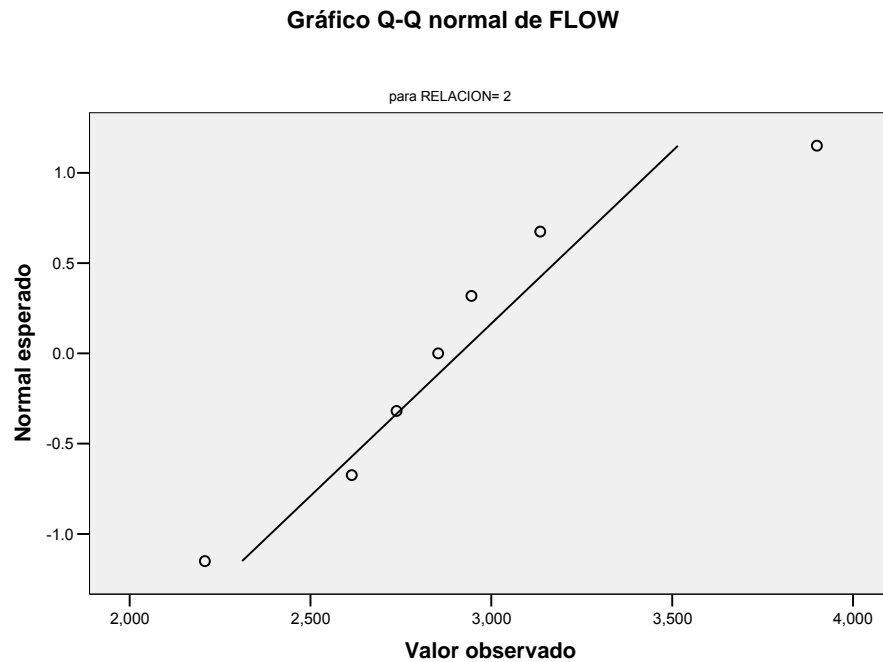
Gráficamente también se evidencia el comportamiento normal de los datos.

Figura 54. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 1 – Demanda Básica



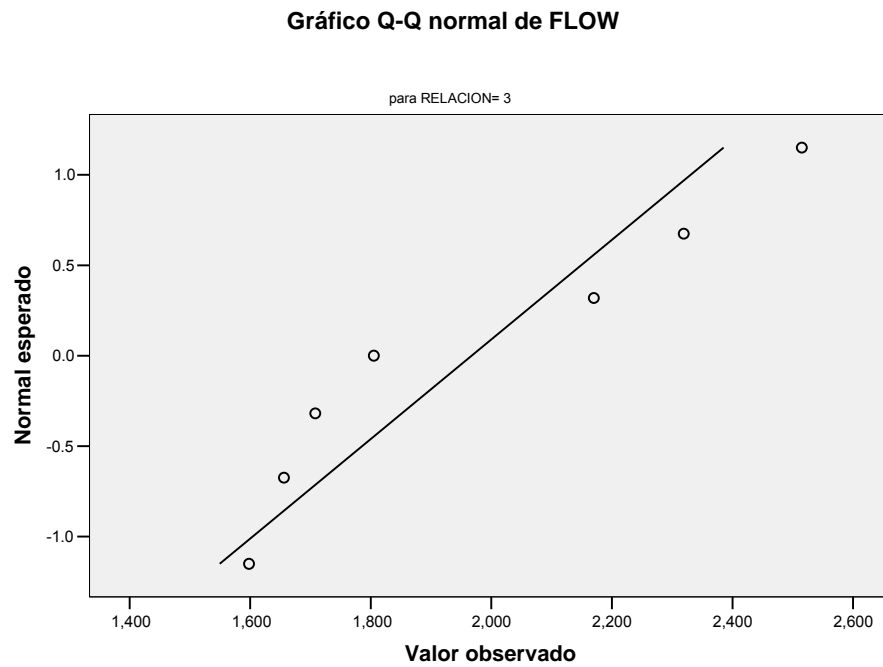
Fuente: SPSS

Figura 55. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 2 – Demanda Básica



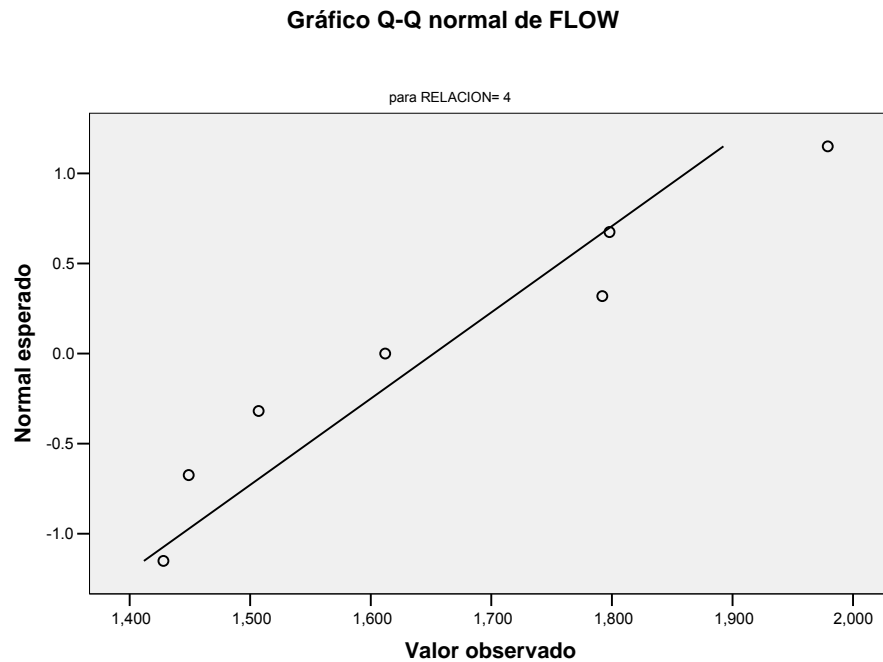
Fuente: SPSS

Figura 56. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 3 – Demanda Básica



Fuente: SPSS

Figura 57. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 4 – Demanda Básica



Fuente: SPSS

Prueba de Homocedasticidad

$$H_0 : \sigma_i^2 = \sigma_j^2$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$$

Tabla 52. Prueba de homogeneidad de varianzas para el *flow time mean* de la demanda básica

Prueba de homogeneidad de varianzas

FLOW			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,723	3	24	,548

Fuente: SPSS

El valor de la significancia para esta prueba (0.548) muestra que no existe una diferencia significativa entre las varianzas de las cuatro poblaciones. Se puede decir, entonces, que con un nivel de confianza del 95% la hipótesis nula de igualdad de varianzas no puede rechazarse.

Análisis de Varianza

Una vez aprobados los supuestos de normalidad y homocedasticidad se procede a realizar el análisis de varianza.

Las hipótesis nula y alternativa para el análisis de varianza son:

$$H_0 : \mu_i = \mu_j$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$$

Tabla 53. Anova para las medias del *flow time mean* de la demanda básica

ANOVA

FLOW					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	12293070	3	4097689,8	22,693	,000
Intra-grupos	4333743,1	24	180572,631		
Total	16626813	27			

Fuente: SPSS

Prueba de Comparación de Medias *a posteriori*

Tabla 54. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del *flow time mean* de la demanda básica

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: FLOW

HSD de Tukey

(I) RELACION	(J) RELACION	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	356,429	227,139	,414	-270,16	983,02
	3	1302,429*	227,139	,000	675,84	1929,02
	4	1617,571*	227,139	,000	990,98	2244,16
2	1	-356,429	227,139	,414	-983,02	270,16
	3	946,000*	227,139	,002	319,41	1572,59
	4	1261,143*	227,139	,000	634,55	1887,73
3	1	-1302,429*	227,139	,000	-1929,02	-675,84
	2	-946,000*	227,139	,002	-1572,59	-319,41
	4	315,143	227,139	,519	-311,45	941,73
4	1	-1617,571*	227,139	,000	-2244,16	-990,98
	2	-1261,143*	227,139	,000	-1887,73	-634,55
	3	-315,143	227,139	,519	-941,73	311,45

*. La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

Análisis de Varianza

Puesto que el valor de la significancia de la prueba (0.000) es menor que 0.05, hay una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula. Es decir, que la hipótesis de igualdad de medias se rechaza. Entonces en la demanda básica, los cuatro tipos de tamaño de lote muestran valores de *flow time mean* promedio distintos.

Lo anterior puede entenderse como que existe evidencia para creer que hay una diferencia significativa entre las medias de los cuatro tipos de lote de transferencia, es decir, que trabajar con cada uno de estos lotes sí genera un impacto diferente en el *flow time mean* obtenido.

Sin embargo, hay que descubrir cuáles de estas medias sí son distintas, es decir, entre cuáles de ellas hay una diferencia significativa. Para esto se aplica una prueba de comparación de medias *a posteriori* que permita identificar cuáles tamaños de lote de transferencia son los que producen un impacto distinto en el *flow time mean*.

Prueba de Comparación de Medias *a posteriori*

Analizando la tabla de comparaciones múltiples se establece que, con un nivel de confianza del 95%, entre la media 1 y las medias 3 y 4 hay diferencias significativas para decir que no son iguales en términos estadísticos. Tampoco es similar la media 2 con las medias 3 y 4. Por lo tanto las medias similares son la 1-2 y la 3-4.

Entonces, al trabajar con un lote de transferencia igual a una Unidad o a Medio lote de proceso y luego utilizar lotes iguales a los de proceso con o sin *setup*, o viceversa, la distancia que aparece entre los valores medios de *flow time mean* sí es significativa.

Según esto, las reducciones que se alcanzan, en la demanda básica, cuando se pasa de un lote de transferencia Igual al lote de proceso con o sin *setup* a trabajar lotes de Medio lote de proceso y de una Unidad, sí son estadísticamente distintas, por lo que se justifica reducir el tamaño del lote de transferencia en estos casos cuando se desea alcanzar valores de *flow time mean* más pequeños.

Por otra parte, no se perciben diferencias entre las medias de las Relaciones 1-2, y 3-4. Por lo que modificar los tamaños de lote entre estas configuraciones no genera impactos significativos en la reducción del *flow time mean*.

Las semejanzas y diferencias anteriores crean los dos siguientes subconjuntos homogéneos de medias.

Tabla 55. Subconjuntos homogéneos para las medias del *flow time mean* de la demanda básica

FLOW

HSD de Tukey^a

RELACION	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
4	7	1652,14	
3	7	1967,29	
2	7		2913,29
1	7		3269,71
Sig.		,519	,414

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 7,000.

Fuente: SPSS

Flow time mean Demanda Básica X 10

Procedimiento General

De forma similar a como se ha realizado en los casos anteriores el procedimiento consta de tres etapas.

- Probar asunciones
- Aplicar Anova
- Aplicar prueba de comparación de medias *a posteriori*.

Resultados en SPSS

Prueba de Normalidad

H₀: La distribución observada para el *flow time mean*, en cada una de las poblaciones, se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

H₁: La distribución observada para el *flow time mean*, en cada una de las poblaciones, no se comporta de acuerdo a la distribución teórica especificada (Normal)

Tabla 56. Prueba de normalidad para el *flow time mean* de la demanda básica X 10

RELACION		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
FLOW	1	,207	7	,200*	,946	7	,694
	2	,207	7	,200*	,946	7	,693
	3	,246	7	,200*	,860	7	,152
	4	,219	7	,200*	,903	7	,350

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

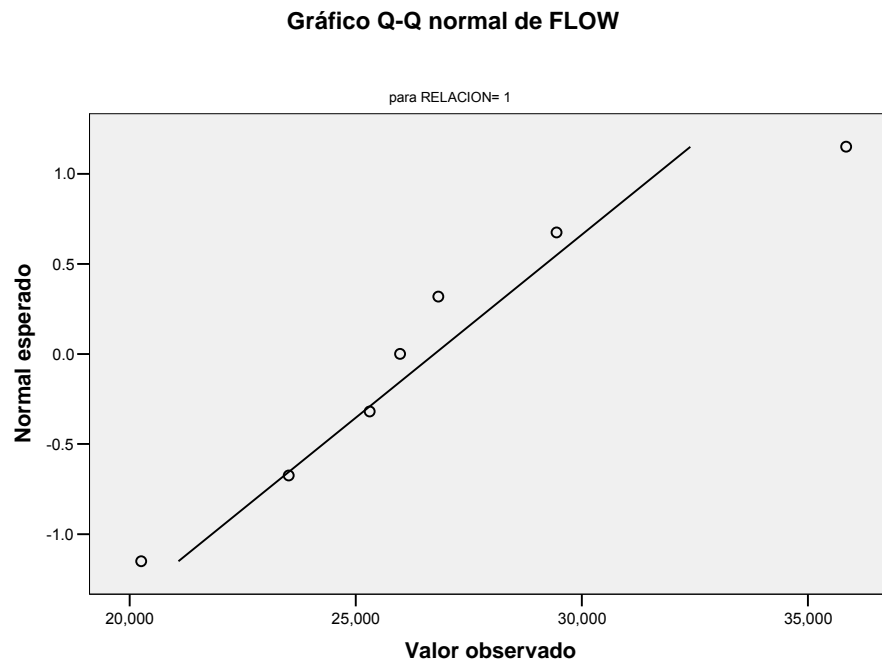
a. Corrección de la significación de Lilliefors

Fuente: SPSS

Según el valor de la significancia (0.200) hay poca evidencia en contra de la hipótesis nula, y por lo tanto ésta no puede rechazarse. Entonces se acepta la hipótesis de que los datos del *flow time mean* en cada población de la demanda básica X 10, se comportan de acuerdo a una distribución normal.

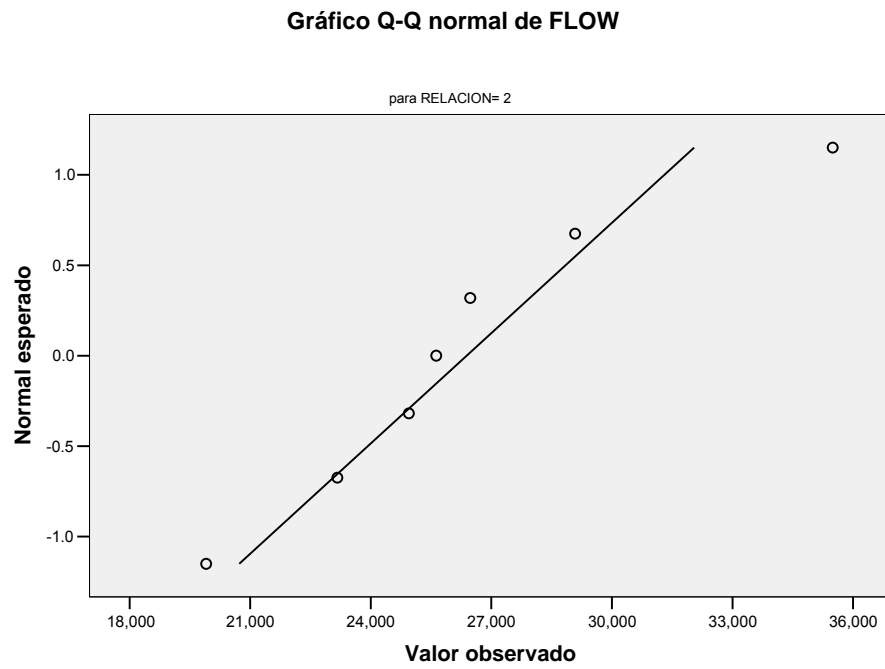
Gráficamente también se evidencia el comportamiento normal de los datos.

Figura 58. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 1 – Demanda Básica X 10



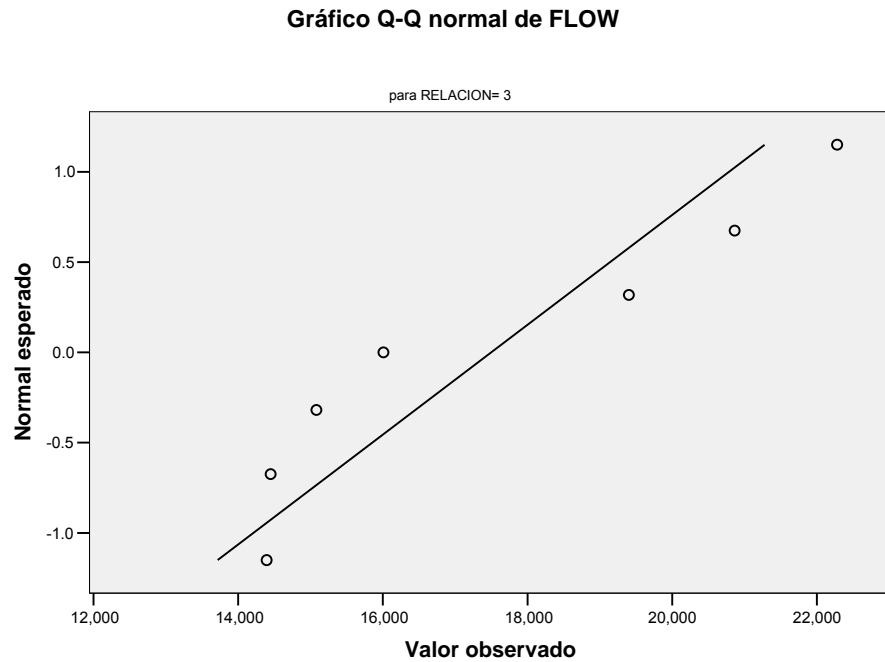
Fuente: SPSS

Figura 59. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 2 – Demanda Básica X 10



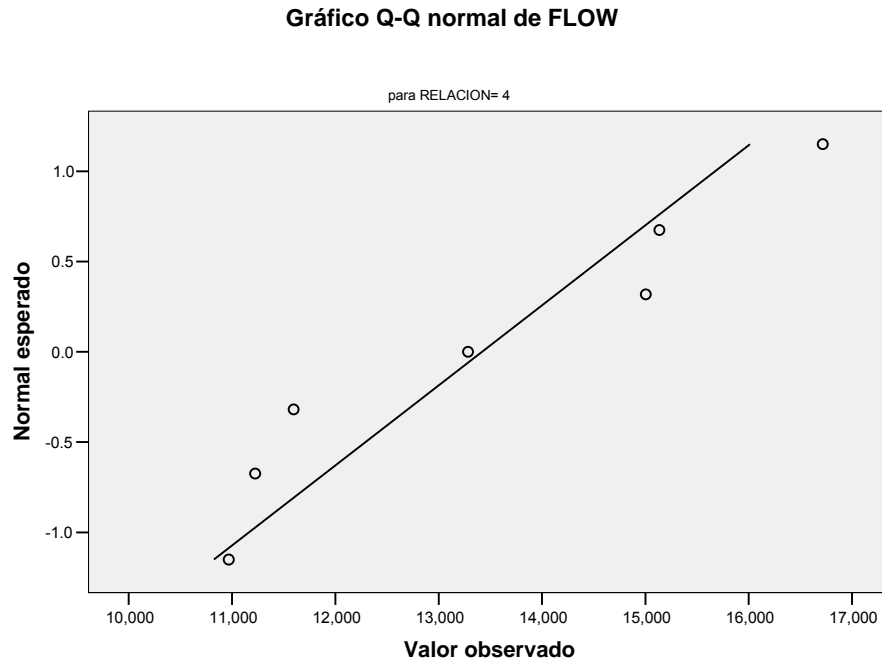
Fuente: SPSS

Figura 60. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 3 – Demanda Básica X 10



Fuente: SPSS

Figura 61. Gráfico de normalidad para el *flow time mean* en la Relación 4 – Demanda Básica X 10



Fuente: SPSS

Prueba de Homocedasticidad

$$H_0 : \sigma_i^2 = \sigma_j^2$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2$$

Tabla 57. Prueba de homogeneidad de varianzas para el *flow time mean* de la demanda básica X 10

Prueba de homogeneidad de varianzas

FLOW			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,604	3	24	,619

Fuente: SPSS

Como el valor de la significancia para esta prueba (0.619) es mayor que 0.05, se observa que no existe una diferencia significativa entre las varianzas de las cuatro poblaciones. Entonces, con un nivel de confianza del 95% se puede establecer que hay poca evidencia en contra de la hipótesis nula y que ésta no puede rechazarse.

Análisis de Varianza

Una vez comprobados los supuestos de normalidad y homocedasticidad se procede a realizar el análisis de varianza.

Las hipótesis nula y alternativa para el análisis de varianza son:

$$H_0 : \mu_i = \mu_j$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$$

Tabla 58. Anova para las medias del *flow time mean* de la demanda básica X 10

ANOVA

FLOW					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	921947664	3	3,1E+008	19,117	,000
Intra-grupos	385805416	24	16075226		
Total	1,31E+009	27			

Fuente: SPSS

Prueba de Comparación de Medias a posteriori

Tabla 59. Prueba de comparaciones múltiples para las medias del *flow time mean* de la demanda básica X 10

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: FLOW

HSD de Tukey

(I) RELACION	(J) RELACION	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	354,429	2143,110	,998	-5557,57	6266,43
	3	9243,571*	2143,110	,001	3331,57	15155,57
	4	13321,571*	2143,110	,000	7409,57	19233,57
2	1	-354,429	2143,110	,998	-6266,43	5557,57
	3	8889,143*	2143,110	,002	2977,14	14801,15
	4	12967,143*	2143,110	,000	7055,14	18879,15
3	1	-9243,571*	2143,110	,001	-15155,57	-3331,57
	2	-8889,143*	2143,110	,002	-14801,15	-2977,14
	4	4078,000	2143,110	,253	-1834,00	9990,00
4	1	-13321,571*	2143,110	,000	-19233,57	-7409,57
	2	-12967,143*	2143,110	,000	-18879,15	-7055,14
	3	-4078,000	2143,110	,253	-9990,00	1834,00

*. La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

Fuente: SPSS

Análisis de Resultados

Análisis de Varianza

Según la significancia de la prueba (0.000), la hipótesis nula de igualdad de medias se rechaza gracias a que hay una fuerte evidencia en contra de ella. Entonces, en la demanda básica X 10, los cuatro tipos de tamaño de lote muestran valores de *flow time mean* promedio distintos.

Por lo anterior, existe evidencia para decir que hay una diferencia significativa entre las medias de los cuatro tipos de lote de transferencia, es decir, que trabajar con cada uno de estos lotes sí genera un impacto diferente en el *flow time mean* obtenido.

A pesar de la diferencia general de medias, ahora hay que descubrir cuáles de estas sí son realmente distintas, es decir, entre cuáles de ellas hay una diferencia significativa. Para esto se aplica una prueba de comparación de medias *a posteriori* que permita identificar cuáles tamaños de lote de transferencia son los que producen un impacto distinto en el *flow time mean*.

Prueba de Comparación de Medias *a posteriori*

Analizando la tabla de comparaciones múltiples se observa el mismo comportamiento que en la demanda básica. Entre la media 1 y las medias 3 y 4, no hay una semejanza suficiente para decir que son iguales en términos estadísticos. Tampoco es similar la media 2 con las medias 3 y 4. Como en el caso anterior, las medias que son estadísticamente similares son las 1-2 y la 3-4.

Entonces, al trabajar con un lote de transferencia igual a una Unidad o a Medio lote de proceso y luego utilizar lotes iguales a los de proceso con o sin *setup*, o viceversa, la distancia que aparece entre los valores medios de *flow time mean* sí es significativa.

Según esto, las reducciones que se alcanzan, en la demanda básica X 10, cuando se pasa de un lote de transferencia igual al lote de proceso con o sin *setup* a trabajar lotes

de Medio lote de proceso y de una Unidad, sí son estadísticamente distintas, por lo que se justifica reducir el tamaño del lote de transferencia en estos casos cuando se desea alcanzar valores de *flow time mean* más pequeños.

Sin embargo, no se perciben diferencias entre las medias de las Relaciones 1-2, y 3-4. Por lo que modificar los tamaños de lote entre estas configuraciones no genera impactos significativos en la reducción del *flow time mean*.

Las semejanzas y diferencias anteriores crean los dos siguientes subconjuntos homogéneos de medias:

Tabla 60. Subconjuntos homogéneos para las medias del *flow time mean* de la demanda básica X 10

FLOW

HSD de Tukey^a

RELACION	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
4	7	13418,57	
3	7	17496,57	
2	7		26385,71
1	7		26740,14
Sig.		,253	,998

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 7,000.

Fuente: SPSS

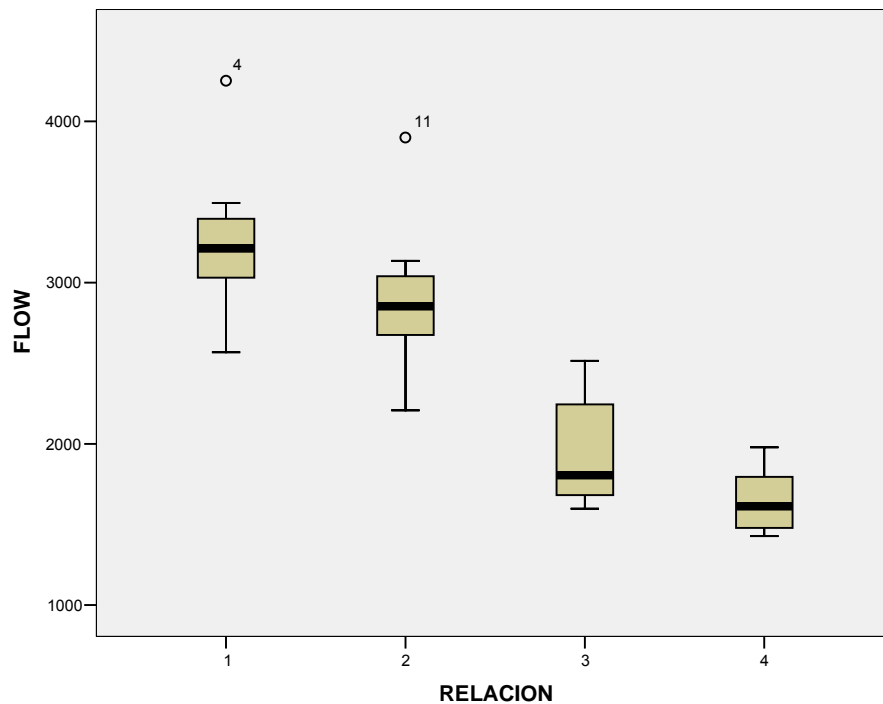
Conclusión General sobre los resultados en la Demanda Básica y la Demanda Básica X 10

La anova aplicada muestra que, tanto en la demanda básica como en la demanda básica X 10, es preferible trabajar con lotes de transferencia de un Unidad cuando se desea alcanzar valores de *flow time mean* más pequeños para las tareas que se están procesando. Este comportamiento aplica para aquellos sistemas productivos que se ajustan a las características propuestas por el modelo de estudio.

Aquí también se analiza el valor que toma el estadístico F en la Anova de la demanda básica y de la demanda básica X 10. El valor para el primer caso (22.693) es mayor que el obtenido para el segundo (19.117). Aparece entonces el mismo comportamiento que el observado para los resultados del *makespan*.

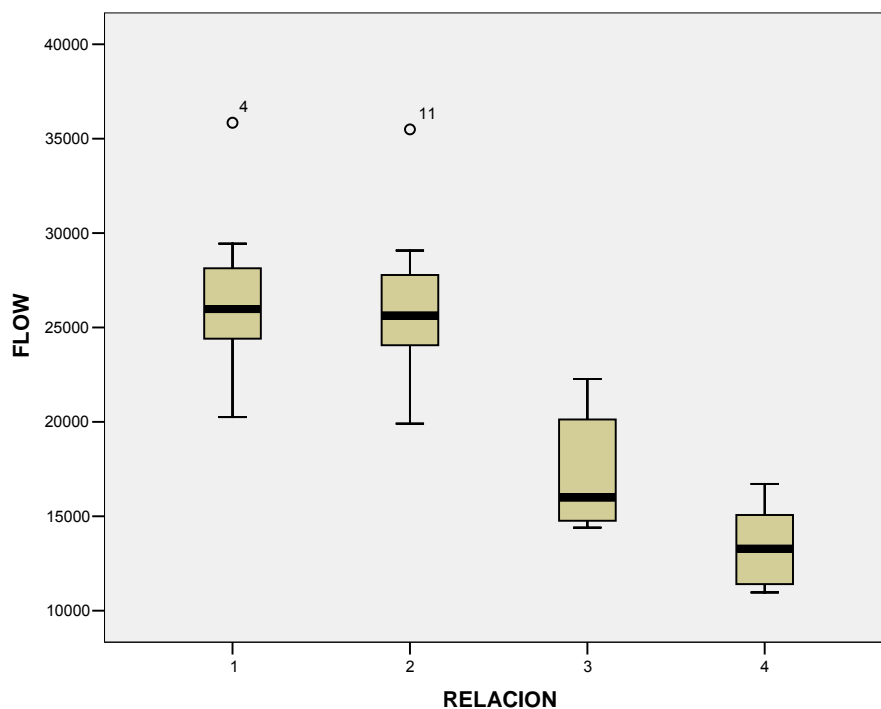
En la demanda baja, las diferencias que se evidenciaron entre las medias de los cuatro tamaños de lote de transferencia son mayores que en la demanda alta. Es decir, la distancia entre las medias para los valores del *flow time mean* es más grande en la demanda básica. En los siguientes diagramas de caja se muestran estas distancias.

Figura 62. Diagrama de caja para los valores del *flow time mean* en la demanda básica



Fuente: SPSS

Figura 63. Diagrama de caja para los valores del *flow time mean* en la demanda básica X 10



Fuente: SPSS

En este caso también se ve cómo las medias de la demanda básica están más alejadas entre sí. Sin embargo, comparando los dos gráficos, la distancia que se reduce de manera notoria al trabajar con la demanda básica y luego con la demanda básica X 10, es aquella entre las medias 1 y 2, es decir, entre los *flow time mean* promedio de los lotes de transferencia igual al lote de proceso y de los lotes igual al lote de proceso con *setup*. Visualmente no se aprecian otras diferencias que sean tan claras como la anterior.

Según esto, la pareja de medias 1-2 es la que más está aportando a la diferencia general de medias en la demanda básica.

Esto también se puede relacionar con la influencia del tiempo de preparación en las demandas pequeñas. Mayores distancias entre las medias muestran mayores reducciones en el *flow time mean*, estas reducciones se hacen más notorias cuando el tiempo de alistamiento es una fracción más grande del tiempo de procesamiento total. Esto gracias a que, como se dijo antes, la distancia entre las medias está relacionada con esta proporción. Se dice entonces que cuánto más grande sea el tiempo de preparación

con relación al tiempo total de procesamiento, más grande será la diferencia obtenida en las medias del *flow time mean* al reducir el tamaño de lote de transferencia.

5.2.3 Contrastes sobre medias

Como en el caso del *makespan*, la prueba de contraste de medias se aplica a los resultados de los porcentajes de reducción del *flow time mean*, para las distintas comparaciones, mencionadas en el apartado 5.1.3, entre los cuatro tamaños de lote de transferencia, entre la demanda básica y de la demanda básica X 10. Por lo tanto se efectúan las mismas seis comparaciones trabajadas anteriormente.

Procedimiento General

- Se estudian los resultados para las cuatro configuraciones del factor Relación y se calculan los porcentajes de reducción entre ellos.
- Se aplica la prueba T para la diferencia de medias, con los datos de las reducciones calculadas, entre la demanda básica y en la demanda básica X 10, y se analizan los resultados.

Resultados en SPSS

Inicialmente aparecen los datos de las reducciones en el *flow time mean*, para las seis comparaciones, que fueron utilizados en SPSS para la aplicación de la prueba de comparación de medias.

Tabla 61. Resultados del *flow time mean* en la demanda básica

	Nivel de Demanda						
LT / LP	1	2	3	4	5	6	7
Igual	2568	3213	2971	4253	3297	3495	3091
Igual - setup	2208	2853	2614	3900	2945	3135	2738
Medio	1656	1708	1805	2515	1598	2319	2170
Unidad	1507	1449	1612	1792	1428	1979	1798

Fuente: autora del proyecto

Tabla 62. Porcentajes de reducción del *flow time mean* en la demanda básica

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual / Igual-setup	14,02%	11,21%	12,01%	8,29%	10,69%	10,30%	11,40%
Igual / Medio	35,51%	46,82%	39,25%	40,86%	51,54%	33,66%	29,78%
Igual / Unidad	41,31%	54,90%	45,73%	57,88%	56,69%	43,38%	41,83%
Igual-setup / Unidad	31,74%	49,20%	38,32%	54,07%	51,51%	36,87%	34,34%
Igual-setup / Medio	25,00%	40,11%	30,96%	35,51%	45,74%	26,04%	20,74%
Medio / Unidad	8,99%	15,18%	10,66%	28,77%	10,63%	14,65%	17,16%

Fuente: autora del proyecto

Tabla 63. Resultados del *flow time mean* en la demanda básica X 10

	Nivel de Demanda						
LT / LP	1	2	3	4	5	6	7
Igual	20256	25308	23520	35846	26828	29443	25980
Igual - setup	19904	24948	23168	35494	26475	29083	25628
Medio	14449	15081	16008	22279	14395	20863	19401
Unidad	10969	11597	13284	15004	11224	16717	15135

Fuente: autora del proyecto

Tabla 64. Porcentajes de reducción del *flow time mean* en la demanda básica X 10

	Nivel de Demanda						
	1	2	3	4	5	6	7
Igual / Igual-setup	1,74%	1,42%	1,50%	0,98%	1,31%	1,22%	1,36%
Igual / Medio	28,67%	40,41%	31,94%	37,85%	46,34%	29,14%	25,32%
Igual / Unidad	45,85%	54,18%	43,52%	58,14%	58,16%	43,22%	41,74%
Igual-setup / Unidad	44,89%	53,52%	42,66%	57,73%	57,60%	42,52%	40,94%
Igual-setup / Medio	27,40%	39,55%	30,90%	37,23%	45,63%	28,26%	24,30%
Medio / Unidad	24,09%	23,10%	17,02%	32,65%	22,02%	19,87%	21,99%

Inicialmente se muestran la media, la desviación y el error típico como estadísticos descriptivos de los porcentajes de reducción en cada comparación.

Tabla 65. Estadísticos descriptivos de los porcentajes de reducción – *flow time mean*

Estadísticos de grupo

	Agrupar	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Red.I.IS	1	7	11,1314	1,73944	,65745
	2	7	1,3614	,23597	,08919
Red.I.M	1	7	39,6314	7,58111	2,86539
	2	7	34,2386	7,52111	2,84271
Red.I.U	1	7	48,8171	7,36420	2,78341
	2	7	49,2586	7,30158	2,75974
Red.IS.U	1	7	42,2929	9,04772	3,41972
	2	7	48,5514	7,45248	2,81677
Red.IS.M	1	7	32,0143	8,93746	3,37804
	2	7	33,3243	7,67576	2,90116
Red.M.U	1	7	15,1486	6,68744	2,52762
	2	7	22,9629	4,86225	1,83776

Fuente: SPSS

Recordando que:

Red.I.IS: reducción al pasar de lote de transferencia Igual a Igual con *setup*.

Red.I.M: reducción al pasar de lote de transferencia Igual a Medio lote.

Red. I.U: reducción al pasar de lote de transferencia Igual a Unidad.

Red.IS.U: reducción al pasar de lote de transferencia Igual con *setup* a Unidad.

Red.IS.M: reducción al pasar de lote de transferencia Igual con *setup* a Medio lote.

Red.M.U: reducción al pasar de lote de transferencia de Medio lote a Unidad.

Prueba de Contraste de Medias

Las hipótesis nula y alternativa para el contraste de medias en cada una de las seis comparaciones para los datos de reducción del *flow time mean* son:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde μ_1 y μ_2 son las medias, en cada comparación, de la demanda básica y la demanda básica X 10 respectivamente.

Tabla 66. Prueba de contraste de medias para las reducciones del *flow time mean*

Prueba de muestras independientes

		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
Red.I.IS	Se han asumido varianzas iguales	4,977	,046	14,726	12	,000	9,77000	,66347	8,32443	11,21557
	No se han asumido varianzas iguales			14,726	6,221	,000	9,77000	,66347	8,16042	11,37958
Red.I.M	Se han asumido varianzas iguales	,048	,831	1,336	12	,206	5,39286	4,03627	-3,40142	14,18713
	No se han asumido varianzas iguales			1,336	11,999	,206	5,39286	4,03627	-3,40148	14,18719
Red.I.U	Se han asumido varianzas iguales	,007	,934	-,113	12	,912	-,44143	3,91963	-8,98157	8,09871
	No se han asumido varianzas iguales			-,113	11,999	,912	-,44143	3,91963	-8,98164	8,09878
Red.IS.U	Se han asumido varianzas iguales	1,053	,325	-1,413	12	,183	-6,25857	4,43042	-15,91164	3,39449
	No se han asumido varianzas iguales			-1,413	11,575	,184	-6,25857	4,43042	-15,95107	3,43393
Red.IS.M	Se han asumido varianzas iguales	,159	,697	-,294	12	,774	-1,31000	4,45286	-11,01194	8,39194
	No se han asumido varianzas iguales			-,294	11,732	,774	-1,31000	4,45286	-11,03654	8,41654
Red.M.U	Se han asumido varianzas iguales	,378	,550	-2,500	12	,028	-7,81429	3,12509	-14,62327	-1,00530
	No se han asumido varianzas iguales			-2,500	10,958	,030	-7,81429	3,12509	-14,69578	-,93279

Fuente: SPSS

La prueba T para diferencia de medias se evalúa, en cada caso, de acuerdo a los resultados de la prueba de hipótesis de igualdad de varianzas del estadístico de Levene. Si el estadístico de Levene deja evidencia para decir que no hay diferencias significativas entre las varianzas de las dos poblaciones, se miran los resultados de la prueba T para la primera fila; si por el contrario, se concluye que las varianzas muestran diferencias claras entre ellas, entonces se toman los resultados de la prueba T para la segunda fila.

En el caso de la comparación I.IS, la significancia de la prueba de Levene (0.046) muestra una fuerte evidencia en contra de la hipótesis de igualdad de varianzas y por lo tanto se miran los resultados de la segunda fila para evaluar la prueba T. La significancia de esta prueba (0.000) permite rechazar la hipótesis de igualdad de las dos medias que se están comparando, los valores de la reducción entre la demanda básica y la demanda básica X 10. Por otra parte, En la demanda básica X 10 se están obteniendo reducciones más pequeñas que las alcanzadas en la demanda básica cuando se modifica el tamaño del lote de transferencia entre estas dos opciones. Según esto, reducir el tamaño del lote de transferencia de uno Igual al lote de proceso a otro Igual con *setup*, trae beneficios mayores en el *flow time mean* cuando se aplica en demandas pequeñas.

En la comparación M.U, se trabaja con los datos de la primera fila para la prueba T, ya que según los resultados de la prueba de Levene (sig. 0.550) se asumen varianzas iguales. La significancia de la prueba T (0.028) muestra una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula, y por lo tanto se rechaza la igualdad de medidas entre las reducciones de la demanda básica y de la demanda básica X 10. Al contrario de la comparación anterior (I.IS), la disminución para este caso en el *flow time mean* es mayor en la demanda básica X 10 que en la demanda básica. Entonces, al cambiar de un lote de transferencia de Medio lote de proceso a una Unidad, las ventajas en el *flow time mean* son más significativas cuando hay que producir grandes cantidades de piezas.

Para los demás casos, comparaciones I.M, I.U, IS.U e IS.M, hay poca evidencia en contra de las hipótesis de igualdad de varianzas y de medias. Entonces, en todas ellas las medias en ambas demandas no difieren significativamente, es decir, el comportamiento de las reducciones en el *flow time mean* es similar en la demanda básica y en la demanda básica X 10. Lo anterior muestra que no importa el número de trabajos que se estén

procesando, se logran beneficios similares. Por lo que realizar los cambios en los lotes de transferencia de estas comparaciones es igualmente favorable en demandas grandes y pequeñas.

Resumiendo el análisis anterior, en la Tabla 67 se muestra en qué tipo de demanda es recomendable utilizar los cambios de lote de transferencia, para cada comparación hecha, cuando se quiere reducir el *flow time mean* de todas las tareas del sistema.

Tabla 67. Tipo de demanda recomendada para los cambios de lote de transferencia – *flow time mean*

Cambio del lote de transferencia	Se recomienda en:
Igual / Igual-setup	Demandas pequeñas
Igual / Medio	Demandas pequeñas y grandes
Igual / Unidad	Demandas pequeñas y grandes
Igual-setup / Unidad	Demandas pequeñas y grandes
Igual-setup / Medio	Demandas pequeñas y grandes
Medio / Unidad	Demandas grandes

Fuente: autora del proyecto

5.3 EVALUACION DEL DESEMPEÑO DE GAMS/CPLEX

Como parte de la metodología propuesta, la evaluación del desempeño de Gams/Cplex es fundamental para las conclusiones del trabajo. Conocer cómo es el funcionamiento del optimizador durante la solución de problemas de programación lineal entera mixta, en los cuales se ha modificado el valor de ciertos parámetros, es importante para determinar si el uso del programa es recomendable en futuras aplicaciones industriales. Para su valoración se tomaron en cuenta los criterios de capacidad, nivel de respuesta alcanzado y tiempo para su obtención.

Capacidad

La capacidad está definida de acuerdo a si Gams/Cplex puede, o no, encontrar algún tipo de respuesta al problema que se busca solucionar, es decir, a su habilidad para procesar toda la información del modelo durante el proceso de solución.

Para los 112 casos el modelo planteado, que involucró la definición de 3 parámetros para 18 operaciones, 7 variables y 286 ecuaciones asociadas en 19 bloques, Gams/Cplex fue capaz de encontrar una solución.

Por lo tanto, su capacidad para resolver el problema de asignación de recursos a las actividades, planteado para la configuración productiva analizada, fue suficiente a lo largo del desarrollo de la investigación. No se presentaron interrupciones durante la ejecución del programa, cada uno de las corridas se hizo de forma continua hasta que se encontró la solución correspondiente. Además, los informes de salida obtenidos en cada caso fueron completos, se consiguió la misma información en todos ellos.

Según lo anterior, y sin olvidar la complejidad del problema tratado, el desempeño de Gams/Cplex fue satisfactorio en cuanto a su capacidad de procesamiento de la información.

Nivel de Respuesta

El nivel de respuesta hace referencia a la categoría de la solución alcanzada. Gams/Cplex puede obtener respuestas de tipo óptima, entera, no-entera intermedia (solución incompleta, aún no alcanza la solución entera) o entera no factible (no se encuentra una solución entera para el problema) para los modelos de programación lineal entera mixta.

La idea fundamental de trabajar con un modelo de PLEM era alcanzar respuestas óptimas para los valores del *makespan* y del *flow time mean*; esto fue posible en todos menos en un caso.

Para el caso del *flow time mean* tomando como lote de transferencia uno igual al lote de proceso con *setup*, en el nivel 2 de la demanda básica X 10, (**caso m3-2-2-12**) se obtuvo una respuesta de tipo Entera. Esta respuesta, aunque no es la solución óptima que se pretendía obtener, es válida cuando se trabaja un modelo de programación lineal entera.

Considerando que las respuestas para los demás casos (111 de 112, equivalente al 99,11%) alcanzaron la categoría de Óptima, se establece que el comportamiento de Gams/Cplex con relación al nivel de respuesta conseguido es favorable.

Tiempo

Examinando el archivo “.log” en los informes de salida de Gams/Cplex se identificó el tiempo de ejecución que necesitó el programa para hallar la solución. En él se muestra el proceso que sigue el programa para encontrar la solución, enseña las diversas iteraciones junto con las soluciones obtenidas en cada una y si se puede mejorar, continúa con el procedimiento de “ramificación y corte”. Este archivo para el caso m3-1-1-01 aparece a continuación.

Archivo “.log” de Gams/Cplex para el caso m3-1-1-01

Node	Nodes Left	Objective	IInf	Best Integer	Best Node	Cuts/ ItCnt	Gap
0	0	160.0000	57		160.0000	65	
		746.0000	52		Cuts: 164	139	
		1350.3056	45		Cuts: 69	247	
		1371.5425	42		Flowcuts: 19	268	
		1371.5425	42		Flowcuts: 13	288	
*23	15	4787.0000	0	4787.0000	2540.0670	500	46.94%
*30+	19	4332.0000	0	4332.0000	2542.3448	596	41.31%
*40+	24	3980.0000	0	3980.0000	2542.3448	694	36.12%
*44	23	3890.0000	0	3890.0000	2542.3448	713	34.64%
*60	19	3350.0000	0	3350.0000	2542.3448	901	24.11%
*92	32	3317.0000	0	3317.0000	2610.2198	1217	21.31%
100	32	3202.3448	27	3317.0000	2855.0000	1264	13.93%
					Cuts: 19		
					Flowcuts: 6		
300	106	2932.0000	11	3252.0000	2932.0000	2660	9.84%
500	174	2932.9750	6	3252.0000	2932.0000	3640	9.84%
					Flowcuts: 1		
*587	115	3152.0000	0	3152.0000	2932.0000	4036	6.98%
*595	74	3080.0000	0	3080.0000	2932.0000	4106	4.81%
*717	80	3047.0000	0	3047.0000	2932.0000	4895	3.77%
800	85	infeasible		3047.0000	2932.0000	5219	3.77%
					Flowcuts: 1		
900	89	2992.0000	6	3047.0000	2932.0000	5581	3.77%
1000	72	2967.0000	11	3047.0000	2932.0000	6013	3.77%
Elapsed b&b time = 2.34 sec. (tree size = 0.02 MB)							
1100	74	2933.5823	3	3047.0000	2932.0000	6756	3.77%
1200	80	infeasible		3047.0000	2932.0000	7382	3.77%

1400	89	2942.0000	8	3047.0000	2932.2439	8685	3.77%
1500	96	2967.0000	6	3047.0000	2932.9165	9261	3.74%
1600	91	2972.0000	9	3047.0000	2933.5366	10049	3.72%
					Flowcuts:	3	
1700	89	infeasible		3047.0000	2945.0000	10646	3.35%
1800	70	infeasible		3047.0000	2960.0000	10972	2.86%
					Flowcuts:	1	
1900	50	3032.0000	4	3047.0000	2960.0000	11432	2.86%
2000	35	infeasible		3047.0000	2967.0000	11907	2.63%

Elapsed b&b time = **4.30** sec. (tree size = 0.01 MB)
 Flow cuts applied: 51
 Gomory fractional cuts applied: 29
 Fixing integer variables, and solving final LP..
 Tried aggregator 1 time.
 LP Presolve eliminated 145 rows and 102 columns.
 Reduced LP has 141 rows, 24 columns, and 282 nonzeros.
 Presolve time = 0.00 sec.

Iteration log . . .

Iteration:	1	Dual infeasibility =	0.000000
Iteration:	2	Dual objective =	125.000000

En las Tablas 68 y 69 se resumen los resultados para el tiempo de ejecución de todos los casos.

En las Figuras 64, 65, 66 y 67 se observa la dispersión de los tiempos de ejecución en las demandas básica y básica X 10 para cada medida de eficacia.

El tiempo promedio que requirió Gams/Cplex para solucionar un caso del *makespan* para la demanda básica fue de 8.59 segundos, mientras que para la demanda básica X 10 fue de 4.12; aunque es una reducción de casi el 50% en la duración, ésta no es significativa, ya que sólo equivale a 4.47 segundos. Entonces, a medida que se modificaron los parámetros del modelo y éstos tomaron valores mayores, Gams/Cplex no presentó alteraciones considerables en su tiempo de ejecución.

Analizando los tiempos para los casos del *flow time mean*, en la demanda básica se demoraron un promedio de 2.03 segundos y en la demanda básica X 10 su promedio fue de 2 segundos. Aquí tampoco se evidencian cambios substanciales en la duración de la ejecución del programa cuando se trabajó con la demanda básica y luego con la demanda básica X 10.

Tabla 68. Tiempo de ejecución en Gams/Cplex para los casos del *makespan*

Caso	Tiempo de Ejecución (seg)	Caso	Tiempo de Ejecución (seg)
m3-1-1-01	4,3	m3-1-1-11	7,75
m3-1-1-02	1,97	m3-1-1-12	< 2
m3-1-1-03	< 2	m3-1-1-13	< 2
m3-1-1-04	< 2	m3-1-1-14	< 2
m3-1-1-05	< 2	m3-1-1-15	9,61
m3-1-1-06	3,22	m3-1-1-16	15,97
m3-1-1-07	1,91	m3-1-1-17	< 2
m3-1-2-01	19,17	m3-1-2-11	< 2
m3-1-2-02	< 2	m3-1-2-12	< 2
m3-1-2-03	< 2	m3-1-2-13	< 2
m3-1-2-04	< 2	m3-1-2-14	< 2
m3-1-2-05	3,94	m3-1-2-15	< 2
m3-1-2-06	65,41	m3-1-2-16	10,98
m3-1-2-07	2,66	m3-1-2-17	< 2
m3-1-3-01	9,56	m3-1-3-11	14,38
m3-1-3-02	< 2	m3-1-3-12	< 2
m3-1-3-03	31,36	m3-1-3-13	9,41
m3-1-3-04	< 2	m3-1-3-14	<2
m3-1-3-05	< 2	m3-1-3-15	< 2
m3-1-3-06	< 2	m3-1-3-16	5,2
m3-1-3-07	< 2	m3-1-3-17	< 2
m3-1-4-01	27,39	m3-1-4-11	< 2
m3-1-4-02	3,28	m3-1-4-12	< 2
m3-1-4-03	< 2	m3-1-4-13	< 2
m3-1-4-04	< 2	m3-1-4-14	< 2
m3-1-4-05	4,23	m3-1-4-15	< 2
m3-1-4-06	6,11	m3-1-4-16	< 2
m3-1-4-07	30,09	m3-1-4-17	< 2

Fuente: autora del proyecto

Tabla 69. Tiempo de ejecución en Gams/Cplex para los casos del *flow time mean*

Caso	Tiempo de Ejecución (seg)	Caso	Tiempo de Ejecución (seg)
m3-2-1-01	< 2	m3-2-1-11	< 2
m3-2-1-02	2,59	m3-2-1-12	< 2
m3-2-1-03	< 2	m3-2-1-13	< 2
m3-2-1-04	< 2	m3-2-1-14	< 2
m3-2-1-05	< 2	m3-2-1-15	< 2
m3-2-1-06	< 2	m3-2-1-16	< 2
m3-2-1-07	< 2	m3-2-1-17	< 2
m3-2-2-01	< 2	m3-2-2-11	< 2
m3-2-2-02	2,16	m3-2-2-12	< 2
m3-2-2-03	< 2	m3-2-2-13	< 2
m3-2-2-04	< 2	m3-2-2-14	< 2
m3-2-2-05	< 2	m3-2-2-15	< 2
m3-2-2-06	< 2	m3-2-2-16	< 2
m3-2-2-07	< 2	m3-2-2-17	< 2
m3-2-3-01	< 2	m3-2-3-11	< 2
m3-2-3-02	< 2	m3-2-3-12	< 2
m3-2-3-03	< 2	m3-2-3-13	< 2
m3-2-3-04	< 2	m3-2-3-14	< 2
m3-2-3-05	< 2	m3-2-3-15	< 2
m3-2-3-06	< 2	m3-2-3-16	< 2
m3-2-3-07	< 2	m3-2-3-17	< 2
m3-2-4-01	< 2	m3-2-4-11	< 2
m3-2-4-02	< 2	m3-2-4-12	< 2
m3-2-4-03	< 2	m3-2-4-13	< 2
m3-2-4-04	< 2	m3-2-4-14	< 2
m3-2-4-05	< 2	m3-2-4-15	< 2
m3-2-4-06	< 2	m3-2-4-16	< 2
m3-2-4-07	< 2	m3-2-4-17	< 2

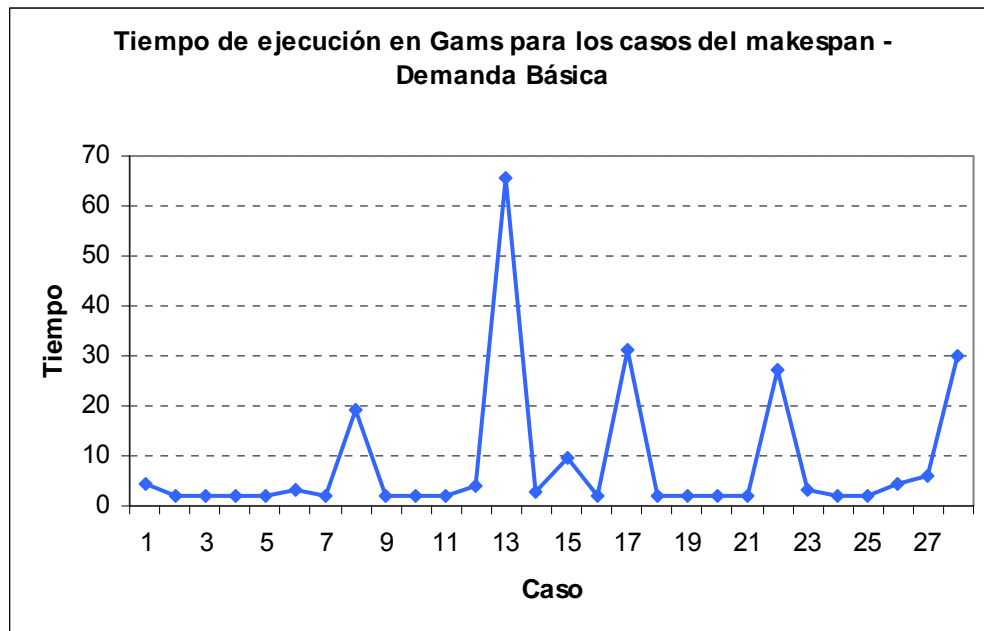
Fuente: autora del proyecto

El tiempo que requirió Gams/Cplex para solucionar los casos que tenían como medida de eficacia el *makespan* presenta una mayor variabilidad, se tiene un tiempo máximo de ejecución de 65,41 segundos y un tiempo mínimo de 2 segundos. Para más de la mitad de los casos no se necesitaron más de 2 segundos para encontrar una respuesta óptima.

Por otra parte, la mayor duración en los casos del *flow time mean* fue de aproximadamente 3 segundos; prácticamente todos los casos (54 de 56, 96.43%) se solucionaron en menos de 2 segundos.

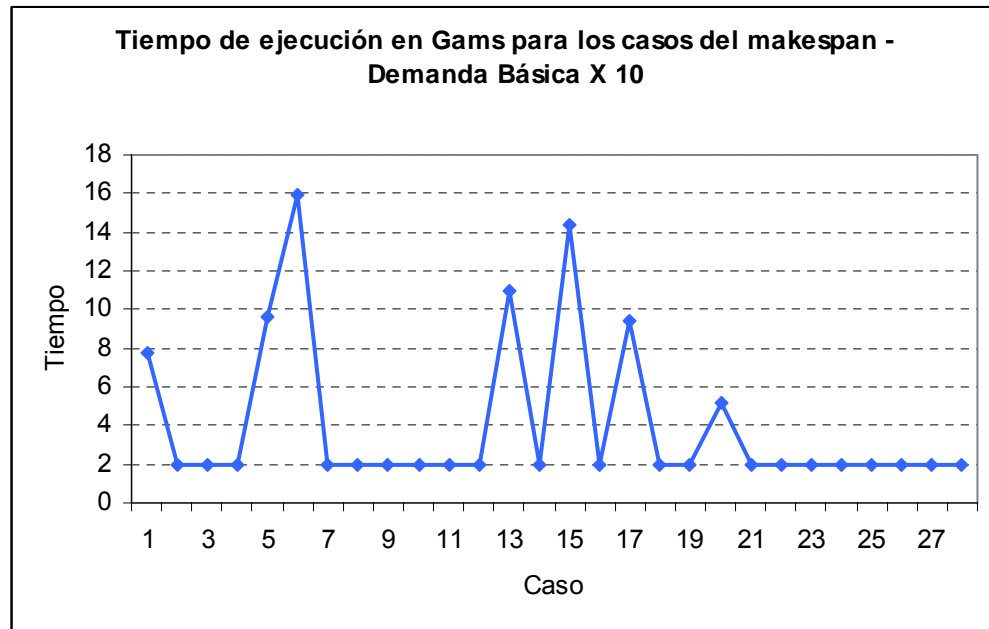
Lo anterior deja evidencia clara sobre el buen desempeño de Gams/Cplex en cuanto al tiempo que requirió para encontrar las respuestas óptimas de la configuración productiva, ya que dar solución a un problema de esta complejidad en máximo 1 minuto y 6 segundos no representa una demora significativa.

Figura 64. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del *makespan* – *Demanda Básica*



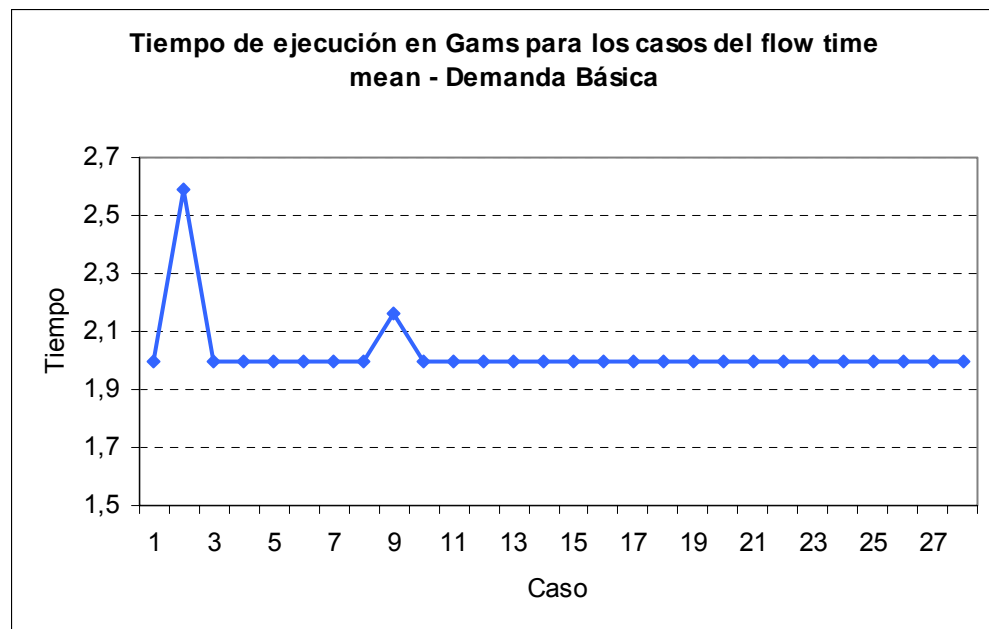
Fuente: Microsoft Excel

Figura 65. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del makespan – Demanda Básica X 10



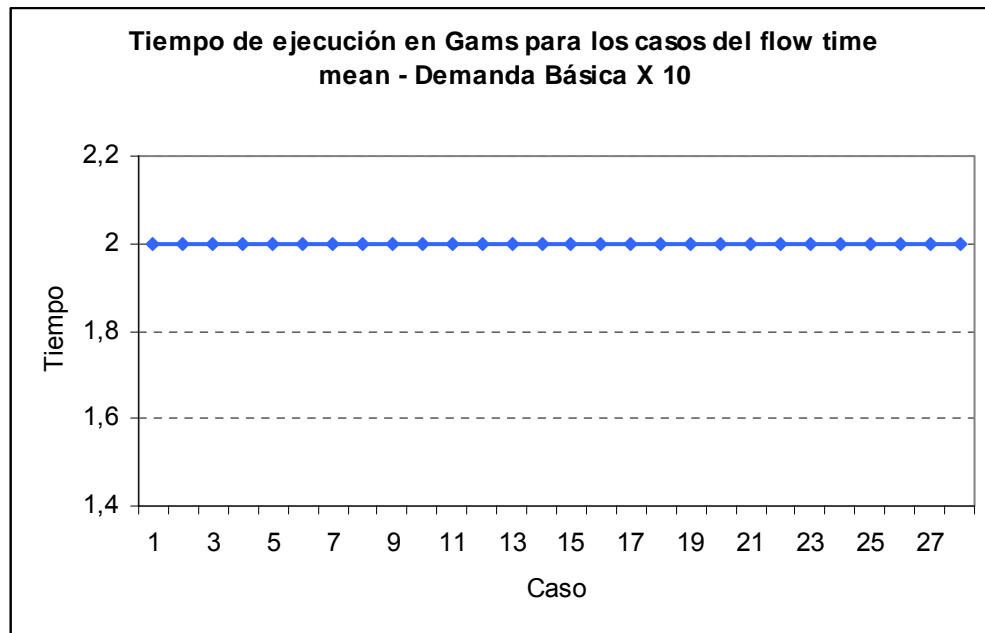
Fuente: Microsoft Excel

Figura 66. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del *flow time mean* – Demanda Básica



Fuente: Microsoft Excel

Figura 67. Tiempo de ejecución en Gams para los casos del flow time mean – Demanda Básica X 10



Fuente: Microsoft Excel

En conclusión, en los tres parámetros analizados, capacidad, nivel de respuesta y tiempo para su obtención, el desempeño de Gams/Cplex fue satisfactorio. Por lo que favoreció el desarrollo de la investigación al proporcionar respuestas óptimas en tiempos relativamente cortos.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La metodología utilizada considerando una configuración multiproducto, que representa un caso general de sistemas tipo *flow shop*, modelizada como un problema de programación lineal entera mixta y solucionada en Gams/Cplex, alcanzando valores óptimos para la gran mayoría de casos, junto con el proceso de evaluación de los resultados mediante técnicas estadísticas, son factores que soportan la validez de los hallazgos de la investigación.
- El análisis de los resultados conseguidos para los 56 casos del *makespan*, muestra el mismo comportamiento para los 4 tipos de lote de transferencia en distintos escenarios de utilización de los recursos. En cada contexto, a medida que se trabajaron tamaños para el lote de transferencia más pequeños, se lograron valores menores para el *makespan* de la configuración productiva. Las máximas reducciones promedio alcanzadas al pasar de trabajar con un lote de transferencia igual al lote de proceso y luego utilizar un lote igual a una unidad, están entre el 43.94%, para la demanda básica, y el 47.013%, para la demanda básica X 10. Estas reducciones en el tiempo de salida de la última pieza del taller, muy cercanas al 50%, ameritan el uso de lotes de transferencia pequeños en sistemas que se ajusten a las características de la configuración productiva estudiada.
- En cuanto al *flow time mean*, también su valor se redujo al trabajar con lotes de transferencia de menor tamaño. Se comprobó que los cuatro tipos de lote de transferencia no presentan diferencias considerables en su comportamiento a lo largo de diferentes niveles de demanda; en todos ellos, cuando se tomaron lotes iguales a una Unidad, se promedió una salida más rápida para las tareas. Al tomar éste (Unidad) como lote de transferencia, se alcanzan reducciones del 48.82% y del 49.26%, para la demanda básica y básica X 10 respectivamente, en el valor de esta medida de eficacia. Al igual que en el caso anterior, estas reducciones

justifican el uso de pequeños lotes de transferencia cuando se quiere minimizar el tiempo promedio de terminación de todas las tareas.

- Se analizó en qué tipo de demandas, pequeñas o grandes, es más recomendable implementar los distintos tipos de lote de transferencia. Cuando se va a reducir el tamaño de lote de transferencia de uno igual a Medio lote de proceso a un lote de una Unidad, sus resultados son favorables para el *makespan* tanto en demandas grandes (reducción de 19.15%) como en demandas pequeñas (reducción de 25.67%), mientras que es conveniente solo en demandas grandes cuando se analiza el *flow time mean* (reducción de 22.96%).

Para el mejoramiento de cualquiera de las dos medidas de eficacia, es aconsejable reducir el tamaño de lote de transferencia de uno Igual al lote de proceso a uno Igual al lote de proceso con *setup* únicamente en demandas pequeñas (reducciones de 7.38% y 11.13%, para el *makespan* y el *flow time mean*, respectivamente), ya que la disminución alcanzada en demandas pequeñas no es sustancial (0.85% y 1.36%, respectivamente).

Para las demás reducciones, su aplicación es recomendable en ambos tipos de demanda.

- Entrando en el tema del desempeño de los apoyos informáticos, se indagó en el conocimiento del desempeño de Cplex como optimizador. Debido a la sencillez que representó para Gams/Cplex la configuración productiva de estudio, el tiempo requerido por el programa para la solución de los casos fue breve. No se observaron duraciones considerables en la ejecución de Gams/Cplex para ninguno de los casos. Además, para el 99.11% de los casos se encontraron soluciones óptimas. Según lo anterior, el comportamiento de Gams/Cplex favoreció al desarrollo de la investigación, no sólo por el tiempo de respuesta sino también por la calidad de la misma, dejando evidencia de su buen desempeño para la implementación de aplicaciones industriales futuras.
- A nivel personal, trabajar en esta investigación permitió profundizar en el conocimiento de temas relacionados con la programación de operaciones, los cuales habían sido tratados en asignaturas como control de producción o

investigación operacional. Por otra parte, fue importante aprovechar la oportunidad y participar en un proyecto de investigación, ya que es satisfactorio vivenciar cómo se desarrollan este tipo de experiencias y reconocer su importancia en la generación del conocimiento. Desarrollar este trabajo representó la posibilidad no sólo para conocer que son muchas las alternativas, sino también para dejar evidencia que sí se puede investigar y que está dentro del alcance de un ingeniero en formación.

6.2 RECOMENDACIONES

- Dar solución, de forma manual, a problemas de programación de operaciones como el tratado en la investigación no es posible debido a la complejidad que traen asociada. Por esto, acudir al uso de optimizadores, como herramientas para la generación de programas de producción, debe fomentarse en las empresas; su uso es un soporte fundamental en el análisis cuantitativo de los procesos, al mismo tiempo que permite ahorrar tiempo en la realización de esta función para que se puedan dedicar esfuerzos a otro tipo de actividades que requieran su atención.
- Dado que la mejora del desempeño del sistema en términos de la reducción del tiempo es importante, es recomendable analizar este tipo de problemas desde la perspectiva del costo, en que se incurre por la transferencia de pequeñas cantidades de piezas entre estaciones, así como evaluar el control que debe implementarse en el taller fruto de la aplicación de esta política. Son variables en cuanto al manejo de materiales que brindan nuevos espacios para investigar.
- Otro campo de investigación puede surgir al estudiar escenarios de configuraciones productivas que incorporen elementos distintos a los tratados en este trabajo. Por ejemplo, explorar sistemas *job shop* con otro tipo de características, que involucran una mayor complejidad en la programación de operaciones, es aconsejable para seguir proponiendo y evaluando estrategias que mejoren los niveles de productividad de los sistemas.

- Particularmente, la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales de la Universidad, debe seguir fomentando el desarrollo de proyectos de investigación en el área de la programación de operaciones, ser un apoyo para las empresas de la región, y al mismo tiempo consolidarse como organismo patrocinador del proceso investigativo de la institución.

BIBLIOGRAFIA

ARSHAM, Hossein. Razonamiento estadístico para decisiones gerenciales. Disponible en Internet. <URL:<http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/Business-stat/opre504S.htm>>

_____. Modelos deterministas: optimización lineal. Disponible en Internet. <URL:<http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/Business-stat/opre/SpanishD.htm>>

BENJAAFAR, S. On production batches, transfer batches, and lead times. En: IIE Transactions. Vol 28 (1996); P. 357-362. Recuperado de la base de datos Hw Wilson.

CHASE, Richard; AQUILANO, Nicholas y JACOBS, Robert. Administración de Producción y Operaciones: Manufactura y Servicios. 8 ed. Bogotá : Mc Graw Hill Interamericana S.A, 2000.

CHEN, Bo., POTTS, Chris and WOEGINGER, Gerhard. A review of machine scheduling: complexity, algorithms and approximability. Disponible en internet. <URL:<http://iwse.eng.ohiostate.edu/ISECourses/ise824/824%20Class%20Papers/SchedSurvey98C henPottsWoeginger.pdf>>

COMPANYNS, Pascual y COROMINAS, Albert. Organización de la producción II: dirección de operaciones 4. Barcelona : Ediciones UPC, 1996.

DÍEZ, Enrique. Producción Industrial: modelos de secuencias. Sevilla : Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 1982.

DOMÍNGUEZ M, José A. Dirección de Operaciones: Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios. Madrid : Mc Graw Hill, 1995.

EILON, Samuel. La Producción: planificación, organización y control. Barcelona : Labor S.A., 1976.

El problema de la programación lineal entera mixta I. Disponible en Internet.
<URL:<http://departamentos.unican.es/macc/personal/profesores/castillo/Transparencias/Curso3.pdf>>

FELDMANN, Martin and BISKUP, Dirk. On lot streaming with multiple products. Disponible en Internet.
<URL:http://bieson.ub.uni-bielefeld.de/volltexte/2005/772/pdf/Diskussionspapier_542.pdf>

HEIZER, Jay y RENDER, Barry. Principios de administración de operaciones. 5 ed. México : Prentice Hall, 2004.

HILLIER, Frederick y LIEBRMAN, Gerarld. Investigación de operaciones. 7 ed. México : Mc Graw Hill Interamericana S.A., 2002.

HOPP, Wallace and SPEARMAN, Mark. Factory Physics. 2 ed. NY : Mc Graw Hill, 2001.

Just in Time Production. Disponible en Internet.
<URL:<http://personal.ashland.edu/~rjacobs/m503jit.html>>

LEE, Chung; LEI, Lei and PINEDO, Michael. Current trends in deterministic scheduling. Disponible en Internet. <URL :<http://www.ie.bilkent.edu.tr/~akturk/ie561/sch-lee.pdf>>

LEFCOVICH, Mauricio. Just in Time: en la búsqueda de la ventaja competitiva. Disponible en Internet.
<URL:<http://72.14.207.104/search?q=cache:SejYyk1GZOkJ:www.ilustrados.com/publicaciones/EEpAAypZpFXMYNCwja.php+%22just+in+time%22+%2B+lotes&hl=es&gl=co&ct=clnk&cd=6>>

LINARES, Pedro, *et al.* Modelos matemáticos de optimización. Disponible en Internet.
<URL:http://www.gams.com/docs/contributed/modelado_en_gams.pdf>

MARIN, Jose Ignacio. Introducción al lenguaje Gams. Documentos de ayuda del programa Gams ide.

MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. 2 ed. México : Limusa - Wiley, 2002.

MORTON, T.W and PENTICO, D.W. Heuristic scheduling systems. NY : John Wiley & Sons, 1993.

NIÑO, Myriam Leonor. Evaluación del sistema de programación de operaciones DBR. Barcelona, 2002, 556 P. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Departamento de Organización de Empresas.

PINEDO, Michael. Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. 2 ed. NJ : Prentice-Hall, 1995.

Programación lineal entra mixta. Disponible en Internet.

<URL:<http://departamentos.unican.es/macc/personal/profesores/castillo/Libro/Chap2.pdf>>

RAMOS, Andrés. Optimización lineal entera mixta. Disponible en Internet.

<URL:http://www.doi.icaei.upcomillas.es/simio/transpa/t_mip_ar.pdf>

RUBEN, R. and MAHMOODI, F. Lot splitting in unbalanced production systems. En: Decision Sciences. Vol. 29 (1998); P. 921-949. Recuperado de la base de datos ProQuest.

SCHROEDER, Roger. Administración de operaciones: toma de decisiones en la función de operaciones. 3 ed. México : Mc Graw Hill Interamericana de México S.A., 1992.

SPSS: guía para el análisis de datos. Disponible en Internet.

<URL:<http://www2.uca.es/serv/ai/formacion/spss/Inicio.pdf>>

TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. 4 ed. México : Limusa S.A, 2002.

UMBLE, Michael y SRIKANTH, M. R. Manufactura Sincrónica: principios para lograr la excelencia de categoría mundial. Ciudad de México : Cecs, 1997.

WILLIAMS, H. Model building in mathematical programming. 4 ed. Londres : John Wiley & Sons, 1999.

REFERENCIAS MENCIONADAS EN EL ESTADO DEL ARTE

BAKER, K.R. and JIA, D. A comparative study of lot streaming procedures. En: OMEGA International Journal of Management Science. Vol. 21(1993); P. 561-566.

BENJAAFAR, S. On production batches, transfer batches, and lead times. En: IIE Transactions. Vol. 28 (1996); P. 357-362.

_____ and SHEIKHZADEH, M. Scheduling policies, batch sizes, and manufacturing lead times. En: IIE Transactions. Vol. 29 (1997); P. 159-166.

DEMEULEMEESTER, E and HEROELEN, W. Modelling setup times, process batches and transfer batches using activity network logic. En: European journal of operational research. Vol. 89 (1996); P. 355-365.

KARMAKAR, U. Lot sizes, lead times and in-process inventories. En: Management Science. Vol 33 (1987); P. 409-418.

_____ . Lot sizing and sequencing delays. En: Management Science. Vol 33 (1987); P. 419-423.

_____ and KEKRE, S. Lot sizing in multi-item multi-machine job shops. En: IIE Transactions. Vol. 17 (1985); P. 290-298.

KARMAKAR, U; KEKRE, S. and KEKRE, S. The dynamic lot sizing problem with startup and reservation costs. Rochester : Graduate school of management working paper No. QM8125, University of Rochester, 1981.

LANGEVIN, A.; RIOPEL, D. and STECKE, K. Transfer batch sizing in flexible manufacturing systems. En: Journal of manufacturing systems. Vol. 18 (1999); P. 140-151.

LEE, Chung-Yee; LEI, Lei and PINEDO, Michael. Current trends in deterministic scheduling. En: Annals of operations research. Vol. 70 (1997); P. 1-41.

POTTS, C.N. and BAKER, K.R. Flow shop scheduling with lot streaming. En: Operations research letters. Vol. 8 (1989); P. 297-303.

TRIETSCH, D. and BAKER, K.R. Basic techniques for lot streaming. En: Operations Research. Vol. 41 (1996); P. 1065-1076.

ZIPKIN, P. Models for design and control of stochastic, multi-item batch production systems. NY : Columbia business school research working paper No. 496A, Columbia University, 1983.

REFERENCIAS COMPLEMENTARIAS

KREIPL, S. and PINEDO, M. Production and operations management. En: Production and operations management. Vol. 13 (2004); P. 77-92.

HALL, N. and POTTS, C. Supply chain scheduling : batching and delivery. En: Operations research. Vol. 51 (2003); P. 566.

LIU, S. and ONG, H.L. A comparative study of algorithms for the flowshop scheduling problem. En: Asia – Pacific journal of operational research. Vol. 19 (2002); P. 205-223.

BUKCHIN, J; TZUR, M. and JAFFE, M. Lot splitting to minimize average flow-time in a two-machine flow shop. En: IIE Transactions. Vol. 34 (2002); P. 953-971.

POTTS, C.N and WASSENHOVE, L.N. Integrating scheduling with batching and lot-sizing: a review of algorithms and complexity. En: Journal of the operational research society. Vol. 43 (1992); P. 395-406.

ARNOLD, R; KUMAR, A. and MOTWANI, J. Flowshop scheduling/sequencing research: a statistical review of the literature, 1952-1994. En: IEEE Transactions of engineering management. Vol. 44 (1997); P. 316-345.

GAREY, M.R. *et al.* The complexity of flowshop and jobshop scheduling. En: Mathematics of operations research. Vol. 1(1976); P. 177.

POTTS, C. and KOVALYOV, M. Scheduling with batching: a review. En: European journal of operational research. Vol. 120 (2000); P. 228.

BAKER, K.R. and JIA, D. A comparative study of lot streaming procedures. En: OMEGA international journal of management science. Vol. 21 (1993); P. 561-566.

DOBSON, G; KARMARKAR, U. and RUMMEL, J. Batching to minimize flow times on one machine. En: Management Science. Vol 33 (1987); P. 784-799.

KALIR, A.A. and SARIN, S.C. Optimal solutions for the single batch flow-shop lot streaming problem with equal sublots. En: Decision Sciences. Vol. 32 (2001); P. 387-397.

SANTOS, C. and MAGAZINE, M. Batching in single operation manufacturing systems. En: Operations research letters. Vol. 4 (1985); P. 99-103.

TRIETSCH, D. and BAKER, K.R. Basic techniques for lot streaming. En: Operations research. Vol. 41(1996); P. 1065-1076.

ANEXOS

Anexo A

Modelización del problema del taller de trabajo por medio de la Programación Lineal Entera Mixta⁴⁸

El problema consiste en determinar el orden o secuencia de los lotes para cada una de las máquinas, respetando las rutas y las capacidades disponibles, de tal forma que se optimice una medida de eficacia determinada.

El modelo para este tipo de problema se define básicamente a través de dos clases de restricciones:

- Restricciones de Secuencia
- Restricciones de Interferencia

Restricciones de Secuencia

Esta restricción es necesaria para garantizar que las operaciones se realizan en el orden tecnológico que establece la ruta.

Las desigualdades que se definen se modifican dependiendo del número de unidades disponibles de cada una de las máquinas comprometidas. Los tipos de restricciones de secuencia presentes en la configuración productiva de esta investigación se muestran en la Figura "Tipos de Restricciones de Secuencia presentes en el modelo de la investigación".

- Restricción de Secuencia Tipo I

Es la secuencia entre dos operaciones que se ejecutan en máquinas de las cuales solo se dispone de una unidad de cada una:

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

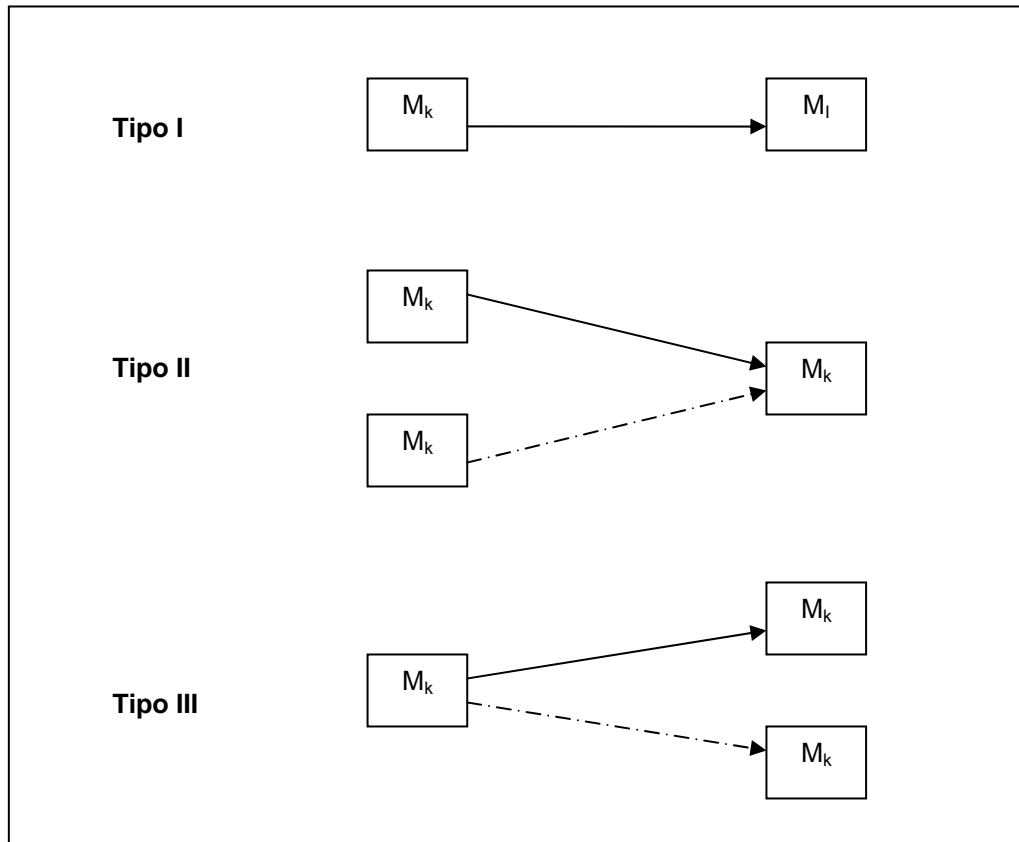
- X: Variable tiempo de inicio de la operación
i: Trabajo
j: Operación precedente
d: Operación siguiente
k: Máquina donde se ejecuta la operación precedente

⁴⁸ Tomado de NIÑO, Myriam. Op. Cit. P. 91-109

l: Máquina donde se ejecuta la operación siguiente

TT: Parámetro tiempo de inicio más temprano posible para la operación siguiente

Tipos de Restricciones de Secuencia presentes en el modelo de la investigación



- Restricción de Secuencia Tipo II

Es la secuencia entre dos operaciones, la operación precedente se ejecuta en una máquina de la que hay disponibles dos unidades y por consiguiente se debe elegir dónde desarrollar la operación. La operación siguiente se realiza en una máquina de la que solo se tiene una unidad:

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

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

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

X: Variable tiempo de inicio de la operación

i: Trabajo

j: Operación precedente

- d : Operación siguiente
- k_1 : Máquina donde es posible ejecutar la operación precedente
- k_2 : Máquina donde es posible ejecutar la operación precedente
- l : Máquina donde se ejecuta la operación siguiente
- Y : Variable binaria que si vale 1 señala que la operación se ejecuta en esa máquina y si vale 0 en la otra
- TT : Parámetro tiempo de inicio más temprano posible para la operación siguiente
- M : Número suficientemente grande para permitir que solo una de las desigualdades sea activa

Si la variable binaria $Y(i,j,k_1) = 1$, la primera ecuación es activa y la segunda es redundante. La tercera ecuación se formula para garantizar que solo se utiliza una de las dos unidades disponibles de la máquina.

- Restricción de Secuencia Tipo III

Es la secuencia entre dos operaciones, la operación precedente se ejecuta en una máquina de la que se tiene una sola unidad y la operación siguiente en una máquina de la cual se dispone de dos unidades y por consiguiente se debe elegir dónde desarrollar la operación.

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

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

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

- X : Variable tiempo de inicio de la operación
- i : Trabajo
- j : Operación precedente
- d : Operación siguiente
- k : Máquina donde se ejecuta la operación precedente
- l_1 : Máquina donde es posible ejecutar la operación siguiente
- l_2 : Máquina donde es posible ejecutar la operación siguiente
- Y : Variable binaria que si vale 1 señala que la operación se ejecuta en esa máquina y si vale 0 en la otra
- TT : Parámetro tiempo de inicio más temprano posible para la operación siguiente
- M : Número suficientemente grande

Si la variable binaria $Y(i,j,l_1) = 1$, la primera ecuación es activa y la segunda es redundante. La tercera ecuación se formula para garantizar que solo se utiliza una de las dos unidades disponibles de la máquina.

- Determinación del parámetro denominado TT

Por lo general, el problema de la programación del taller de trabajo es modelizado de tal forma que las restricciones de secuencia se establecen para que la operación siguiente solo pueda iniciar una vez se concluya todo el lote de proceso en la operación precedente.

La diferenciación entre lotes de proceso y lotes de transferencia permite que cuando el tamaño de lote de transferencia es más pequeño que el tamaño del lote de proceso, la operación siguiente no espere a que se terminen todas las piezas de la operación precedente y las actividades de producción se puedan superponer.

Existen tres consideraciones que se deben tener en cuenta para esta situación:

La última unidad del lote de proceso de la máquina que realiza la operación siguiente tiene que ser procesada después de que se termine el lote de proceso completo en la máquina que desarrolla la operación precedente

La producción de la primera unidad del lote de proceso en la máquina que ejecuta la operación siguiente solo puede iniciar cuando esta unidad termina su proceso en la máquina que desarrolla la operación precedente

En esta investigación se permite que la operación siguiente inicie antes que su operación precedente siempre y cuando se garantice que se cumplen las otras dos consideraciones mencionadas anteriormente. Es posible que el tiempo de preparación de la máquina para la operación siguiente se inicie antes o superponga con el tiempo de preparación o el tiempo de proceso del mismo lote en la máquina que ejecuta la operación precedente

El plazo mínimo entre los instantes de inicio para la operación siguiente se define como el parámetro TT, el cual puede tener un valor negativo para aquellos casos en que la operación siguiente inicia antes que la operación precedente.

Las situaciones que se pueden presentar en la configuración productiva analizada son las siguientes:

Caso 1

El tiempo de proceso del lote (PL) en la operación siguiente es menor que el tiempo de proceso de lote en la operación precedente. Se debe garantizar que la última unidad del lote de proceso en la máquina siguiente se trabaje después de que termine el lote de proceso completo en la máquina que ejecuta la operación precedente.

Caso 2

El tiempo de proceso de lote en la operación siguiente es mayor que el tiempo de proceso de lote en la operación precedente. Se debe garantizar que la primera unidad del lote de proceso en la máquina siguiente se trabaje lo antes que sea posible, es decir, inmediatamente termina su proceso en la operación precedente.

Restricciones de Interferencia

Esta restricción se formula para evitar que dos operaciones se programen para utilizar simultáneamente una misma máquina.

- Restricción de Interferencia Tipo I

Este tipo de restricción se formula en aquellos casos en donde sólo se tiene una unidad de la máquina. Existen ligaduras disyuntivas entre dos trabajos cualquiera i, r en una máquina que se pueden presentar por las siguientes desigualdades:

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

O bien

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

X : Tiempo de inicio de la operación
 i : Trabajo
 r : Trabajo
 j : Operación
 d : Operación
 k : Máquina donde se realizan las operaciones j, d
 PL : Tiempo de proceso de lote

Este tipo de ligadura se trata mediante un modelo lineal con una variable binaria $Z(i, j, r, d, k)$, que vale uno si el trabajo (i, j) precede al trabajo (r, d) en la máquina k , no necesariamente de forma inmediata y cero en caso contrario. En consecuencia se deben formular las siguientes restricciones:

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

- Restricción de Interferencia Tipo II

Este tipo de restricción se refiere a aquellos casos en donde se disponen de dos unidades o más de una misma máquina. Para formular las restricciones de interferencia es necesario verificar que efectivamente las operaciones se desarrollan en la misma unidad. Para esto se necesita una variable binaria $W(i,j,r,d,k)$ que vale uno si efectivamente las operaciones se ejecutan en la misma unidad de la máquina y cero en caso contrario.

La condición lógica:

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

Se representa por medio de las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} -Y(i,j,k) + W(i,j,r,d,k) &\leq 0 \\ -Y(r,d,k) + W(i,j,r,d,k) &\leq 0 \\ Y(i,j,k) + Y(r,d,k) - W(i,j,r,d,k) &\leq 1 \end{aligned}$$

La formulación de las restricciones de interferencia depende del valor que tome la variable binaria $W(i,j,r,d,k)$, en cada caso. Esta situación se plantea a través de las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} X(i,j,k_1) - X(r,d,k_1) + A * U(i,j,r,d,k_1) &\geq PL(r,d,k_1) + A \\ X(i,j,k_1) - X(r,d,k_1) - (M + B) * U(i,j,r,d,k_1) &\geq PL(r,d,k_1) - B \\ X(r,d,k_1) - X(i,j,k_1) + A * V(i,j,r,d,k_1) &\geq PL(r,d,k_1) + A \\ X(r,d,k_1) - X(i,j,k_1) - (M + B) * V(i,j,r,d,k_1) &\geq PL(r,d,k_1) - B \end{aligned}$$

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 la restricción se rompe

Adicionalmente a las restricciones anteriores, es necesario formular dos restricciones más para las variables binarias, para garantizar que solo serán activas un par de las cuatro restricciones de interferencia planteadas anteriormente.

$$\begin{aligned} W(i,j,r,d,k_1) + U(i,j,r,d,k_1) + V(i,j,r,d,k_1) &\leq 2 \\ W(i,j,r,d,k_1) - U(i,j,r,d,k_1) - V(i,j,r,d,k_1) &\leq 0 \end{aligned}$$

Medidas de Eficacia

- Instante de salida de la última pieza del taller – *Makespan*

Para la medida de eficacia del instante de salida de la última pieza del taller, es necesario formular para la última operación de cada trabajo, una restricción que se modifica dependiendo de si existe una sola unidad o varias de la máquina en donde la operación se desarrolla.

En este caso, la última operación de todos los trabajos se realiza en una máquina que solo dispone de una unidad. La restricción que se debe formular es la siguiente:

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

T : Variable que representa la terminación del proceso

z : Última operación del trabajo

La función objetivo es minimizar la variable T

- Tiempo medio de permanencia en el taller – *Flow Time Mean*

Para el tiempo medio de permanencia en el taller, la restricción que se formula para la última operación, se modifica colocando la variable T en función del trabajo que se realiza. Como en este caso, la última operación de todos los trabajos termina en una de la que se dispone solo una unidad, la restricción es:

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

La función objetivo para este caso es: $\text{Min } \sum T(i)$

Restricciones de secuencia e interferencia para la configuración productiva de estudio

Una vez entendido lo descrito en el apartado anterior, las restricciones de secuencia y de interferencia se identificaron claramente para la configuración del estudio. Se analizó la ruta en la que debían procesarse los trabajos y de esta manera se reconocieron cuáles actividades sucesivas correspondían a cada tipo. En las siguientes tablas se muestran las restricciones mencionadas.

Restricciones de Secuencia Tipo I

Actividad Precedente	Actividad Siguiete	Actividad Precedente	Actividad Siguiete
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₅ .O ₂ .M ₃₁	T ₅ .O ₄ .M ₄₁
T ₂ .O ₁ .M ₃₁	T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₆ .O ₂ .M ₃₁	T ₆ .O ₅ .M ₄₁
T ₃ .O ₁ .M ₃₁	T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₇ .O ₂ .M ₃₁	T ₇ .O ₅ .M ₄₁
T ₄ .O ₂ .M ₃₁	T ₄ .O ₄ .M ₄₁	T ₈ .O ₂ .M ₃₁	T ₈ .O ₅ .M ₄₁

Restricciones de Secuencia Tipo II

Actividad Precedente	Actividad Siguiete	Actividad Precedente	Actividad Siguiete
T ₁ .O ₆ .M ₁₁	T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₁ .O ₆ .M ₁₂	T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁
T ₂ .O ₆ .M ₁₁	T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₂ .O ₆ .M ₁₂	T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁
T ₃ .O ₇ .M ₁₁	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₃ .O ₇ .M ₁₂	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁
T ₄ .O ₈ .M ₁₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₄ .O ₈ .M ₁₂	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁
T ₅ .O ₈ .M ₁₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁	T ₅ .O ₈ .M ₁₂	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁
T ₆ .O ₉ .M ₁₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁	T ₆ .O ₉ .M ₁₂	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁
T ₇ .O ₁₀ .M ₁₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₀ .M ₁₂	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁
T ₈ .O ₁₀ .M ₁₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₀ .M ₁₂	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁

Restricciones de Secuencia Tipo III

Actividad Precedente	Actividad Siguiete	Actividad Precedente	Actividad Siguiete
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₁ .O ₆ .M ₁₁	T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₁ .O ₆ .M ₁₂
T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₂ .O ₆ .M ₁₁	T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₂ .O ₆ .M ₁₂
T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₃ .O ₇ .M ₁₁	T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₃ .O ₇ .M ₁₂
T ₄ .O ₄ .M ₄₁	T ₄ .O ₈ .M ₁₁	T ₄ .O ₄ .M ₄₁	T ₄ .O ₈ .M ₁₂
T ₅ .O ₄ .M ₄₁	T ₅ .O ₈ .M ₁₁	T ₅ .O ₄ .M ₄₁	T ₅ .O ₈ .M ₁₂
T ₆ .O ₅ .M ₄₁	T ₆ .O ₉ .M ₁₁	T ₆ .O ₅ .M ₄₁	T ₆ .O ₉ .M ₁₂
T ₇ .O ₆ .M ₄₁	T ₇ .O ₁₀ .M ₁₁	T ₇ .O ₆ .M ₄₁	T ₇ .O ₁₀ .M ₁₂
T ₈ .O ₅ .M ₄₁	T ₈ .O ₁₀ .M ₁₁	T ₈ .O ₅ .M ₄₁	T ₈ .O ₁₀ .M ₁₂

Restricciones de Interferencia Tipo I – Máquina 2

Actividad Precedente	Actividad Siguierte	Actividad Precedente	Actividad Siguierte
T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁
T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁
T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁
T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁
T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁
T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁
T ₁ .O ₁₁ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁
T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁
T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁
T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁
T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁	T ₅ .O ₁₅ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁
T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁
T ₂ .O ₁₂ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁	T ₆ .O ₁₆ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁
T ₃ .O ₁₃ .M ₂₁	T ₄ .O ₁₄ .M ₂₁	T ₇ .O ₁₇ .M ₂₁	T ₈ .O ₁₈ .M ₂₁

Restricciones de Interferencia Tipo I – Máquina 3

Actividad Precedente	Actividad Siguierte	Actividad Precedente	Actividad Siguierte
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₂ .O ₁ . M ₃₁	T ₃ .O ₁ . M ₃₁	T ₅ .O ₂ . M ₃₁
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₃ .O ₁ . M ₃₁	T ₃ .O ₁ . M ₃₁	T ₆ .O ₂ . M ₃₁
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₄ .O ₂ . M ₃₁	T ₃ .O ₁ . M ₃₁	T ₇ .O ₂ . M ₃₁
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₅ .O ₂ . M ₃₁	T ₃ .O ₁ . M ₃₁	T ₈ .O ₂ . M ₃₁
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₆ .O ₂ . M ₃₁	T ₄ .O ₂ . M ₃₁	T ₅ .O ₂ . M ₃₁
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₇ .O ₂ . M ₃₁	T ₄ .O ₂ . M ₃₁	T ₆ .O ₂ . M ₃₁
T ₁ .O ₁ .M ₃₁	T ₈ .O ₂ . M ₃₁	T ₄ .O ₂ . M ₃₁	T ₇ .O ₂ . M ₃₁
T ₂ .O ₁ . M ₃₁	T ₃ .O ₁ . M ₃₁	T ₄ .O ₂ . M ₃₁	T ₈ .O ₂ . M ₃₁
T ₂ .O ₁ . M ₃₁	T ₄ .O ₂ . M ₃₁	T ₅ .O ₂ . M ₃₁	T ₆ .O ₂ . M ₃₁
T ₂ .O ₁ . M ₃₁	T ₅ .O ₂ . M ₃₁	T ₅ .O ₂ . M ₃₁	T ₇ .O ₂ . M ₃₁
T ₂ .O ₁ . M ₃₁	T ₆ .O ₂ . M ₃₁	T ₅ .O ₂ . M ₃₁	T ₈ .O ₂ . M ₃₁
T ₂ .O ₁ . M ₃₁	T ₇ .O ₂ . M ₃₁	T ₆ .O ₂ . M ₃₁	T ₇ .O ₂ . M ₃₁
T ₂ .O ₁ . M ₃₁	T ₈ .O ₂ . M ₃₁	T ₆ .O ₂ . M ₃₁	T ₈ .O ₂ . M ₃₁
T ₃ .O ₁ . M ₃₁	T ₄ .O ₂ . M ₃₁	T ₇ .O ₂ . M ₃₁	T ₈ .O ₂ . M ₃₁

Restricciones de Interferencia Tipo I – Máquina 4

Actividad Precedente	Actividad Siguiente	Actividad Precedente	Actividad Siguiente
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₅ .O ₄ . M ₄₁
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₃ .O ₃ . M ₄₁	T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₆ .O ₅ . M ₄₁
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₄ .O ₄ . M ₄₁	T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₇ .O ₅ . M ₄₁
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₅ .O ₄ . M ₄₁	T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₈ .O ₅ . M ₄₁
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₆ .O ₅ . M ₄₁	T ₄ .O ₄ .M ₄₁	T ₅ .O ₄ . M ₄₁
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₇ .O ₅ . M ₄₁	T ₄ .O ₄ .M ₄₁	T ₆ .O ₅ . M ₄₁
T ₁ .O ₃ .M ₄₁	T ₈ .O ₅ . M ₄₁	T ₄ .O ₄ .M ₄₁	T ₇ .O ₅ . M ₄₁
T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₃ .O ₃ . M ₄₁	T ₄ .O ₄ .M ₄₁	T ₈ .O ₅ . M ₄₁
T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₄ .O ₄ . M ₄₁	T ₅ .O ₄ .M ₄₁	T ₆ .O ₅ . M ₄₁
T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₅ .O ₄ . M ₄₁	T ₅ .O ₄ .M ₄₁	T ₇ .O ₅ . M ₄₁
T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₆ .O ₅ . M ₄₁	T ₅ .O ₄ .M ₄₁	T ₈ .O ₅ . M ₄₁
T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₇ .O ₅ . M ₄₁	T ₆ .O ₅ .M ₄₁	T ₇ .O ₅ . M ₄₁
T ₂ .O ₃ .M ₄₁	T ₈ .O ₅ . M ₄₁	T ₆ .O ₅ .M ₄₁	T ₈ .O ₅ . M ₄₁
T ₃ .O ₃ .M ₄₁	T ₄ .O ₄ . M ₄₁	T ₇ .O ₅ .M ₄₁	T ₈ .O ₅ . M ₄₁

Restricciones de Interferencia Tipo II – Máquina 1

Actividad Precedente	Actividad Siguiente	Actividad Precedente	Actividad Siguiente
T ₁ .O ₆ .M ₁₁	T ₂ .O ₆ .M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₂ .O ₆ .M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ .M ₁₂	T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₂

T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₁ .O ₆ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₅ .O ₈ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₂ .O ₆ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₆ .O ₉ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₃ .O ₇ . M ₁₁	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₁	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂
T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₁	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₁
T ₃ .O ₇ . M ₁₂	T ₄ .O ₈ . M ₁₂	T ₇ .O ₁₀ . M ₁₂	T ₈ .O ₁₀ . M ₁₂

Anexo B

Modelización del problema en Gams/Cplex⁴⁹

La descripción del modelo de PLEM en Gams/Cplex se hace trabajando con las siguientes definiciones:

SETS: es la definición de los índices a utilizar en la formulación del modelo.

- I Los trabajos a desarrollar: T_1, \dots, T_8
- J Operaciones en los trabajos: O_1, \dots, O_{18}
- K Recursos o máquinas: $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{31}, M_{41}$

ALIAS: son índices equivalentes que dan flexibilidad en la formulación de las restricciones.

I = R

J = D

K = L

SECUEN1: este grupo contiene las relaciones de secuencia denominadas de Tipo I.

SECUEN2: al igual que el grupo anterior, contiene las relaciones de secuencia denominadas de Tipo I. Se separan porque pertenecen a un punto de divergencia y se necesita asignar un TT diferente, en este caso identificado como TT_2 .

SECUEN3: contiene relaciones de secuencia de Tipo II.

SECUEN4: al igual que el grupo Secuen3 contiene relaciones de secuencia de Tipo II. Se separa porque pertenecen a un punto de divergencia y se necesita asignar un TT diferente, en este caso identificado como TT_2 .

SECUEN5: contiene las relaciones de secuencia de Tipo III.

⁴⁹ Ibid. P. 383-387

SECUEN6: al igual que el grupo anterior contiene relaciones de secuencia de Tipo III. Se separan porque pertenecen a un punto de divergencia y se necesita asignar un TT diferente, en este caso identificado como TT_2 .

ARIA: son las restricciones definidas para las variables binarias Y para garantizar que solo se utiliza una de las máquinas disponibles.

BIN: estas restricciones previas a las variables binarias son necesarias previas a la formulación de las restricciones de interferencia.

INTER1: contiene las relaciones de interferencia Tipo I.

INTER2: contiene las relaciones de interferencia Tipo II.

ULTI1: contiene la última actividad de cada trabajo, en este caso se desarrolla en una máquina de la cual solo se dispone de una unidad.

PARAMETER $P(i,j,k)$: se da el tiempo de proceso unitario en minutos para cada una de las actividades

PARAMETER $PL(i,j,k)$: contiene los valores del tiempo de proceso de lote en minutos, incluido el tiempo de preparación, para cada una de las actividades.

PARAMETER $TT(i,j,k)$: se dan los tiempos de inicio más temprano posibles, en minutos, para cada una de las operaciones siguientes.

PARAMETER $TT_2(i,j,k)$: es el tiempo de inicio más temprano posible, en minutos, para una operación siguiente. Este valor se separa del grupo anterior en razón de que se trata de un punto de divergencia en donde se tienen dos operaciones siguientes.

SCALAR: los valores constantes M , A y B , utilizados en la formulación de algunas de las restricciones se han definido para este modelo de la siguiente forma: M que se pide sea un valor lo más grande que sea posible, se ha definido con base en el mayor tiempo de proceso de una máquina. En este caso si todas las operaciones se ejecutaron en una de las dos máquinas disponibles de M_1 el tiempo total requerido sería de 3945 minutos, se elige como valor de M 4100. Para el caso de la demanda básica X_{10} , se utiliza un M de 41000.

Para A que se pide un valor lo más pequeño posible, se escoge el valor negativo de M es decir -4100.
 Para el caso de la demanda básica X 10, se utiliza un A de -41000.
 El valor de B que es un *Epsilon*, se escoge de una unidad, en ambos casos.

POSITIVE VARIABLES: se define como variable positiva el tiempo de inicio en minutos de una operación, identificada en el modelo como X(i,j,k)

VARIABLES: se define como variable T, la medida de eficacia a optimizar en el modelo, en este caso es el instante de salida de la última pieza del taller.

BINARY VARIABLES: define todas las variables binarias utilizadas en el modelo

Y(i,j,k) Z(i,j,r,d,k) W(l,j,r,d,k) U(i,j,r,d,k) V(i,j,r,d,k)

EQUATIONS: define los 19 bloques de ecuaciones que se utilizan en la formulación del modelo y sus respectivas ecuaciones.

Descripción del modelo en lenguaje Gams para el caso m3-1-1-01

\$ontext

LT = LP

Demanda Basica = 1

\$offtext

SETS

i Trabajos /t1*t8/

j Operaciones /o1*o18/

k Recursos /m11, m12, m21, m31, m41/;

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

SET secuen1(i,j,k,r,d,l)

/t1.o1.m31.t1.o3.m41, t4.o2.m31.t4.o4.m41/;

SET secuen2(i,j,k,r,d,l)

/t4.o2.m31.t6.o5.m41/;

SET secuen3(i,j,k,r,d,l)

/t1.o6.m11.t1.o11.m21, t1.o6.m12.t1.o11.m21,
 t3.o7.m11.t3.o13.m21, t3.o7.m12.t3.o13.m21,
 t4.o8.m11.t4.o14.m21, t4.o8.m12.t4.o14.m21,
 t6.o9.m11.t6.o16.m21, t6.o9.m12.t6.o16.m21,
 t7.o10.m11.t7.o17.m21, t7.o10.m12.t7.o17.m21/;

SET secuen4(i,j,k,r,d,l)
/t1.o6.m11.t2.o12.m21, t1.o6.m12.t2.o12.m21,
t4.o8.m11.t5.o15.m21, t4.o8.m12.t5.o15.m21,
t7.o10.m11.t8.o18.m21, t7.o10.m12.t8.o18.m21/;

SET secuen5(i,j,k,r,d,l)
/t1.o3.m41.t1.o6.m11, t1.o3.m41.t1.o6.m12,
t4.o4.m41.t4.o8.m11, t4.o4.m41.t4.o8.m12,
t6.o5.m41.t6.o9.m11, t6.o5.m41.t6.o9.m12/;

SET secuen6(i,j,k,r,d,l)
/t1.o3.m41.t3.o7.m11, t1.o3.m41.t3.o7.m12,
t6.o5.m41.t7.o10.m11, t6.o5.m41.t7.o10.m12/;

SET aria(i,j,k,l)
/t1.o6.m11.m12, t3.o7.m11.m12, t4.o8.m11.m12,
t6.o9.m11.m12, t7.o10.m11.m12/;

SET bin(i,j,k,r,d)
/t1.o6.m11.t3.o7, t1.o6.m11.t4.o8, t1.o6.m11.t6.o9, t1.o6.m11.t7.o10,
t3.o7.m11.t4.o8, t3.o7.m11.t6.o9, t3.o7.m11.t7.o10, t4.o8.m11.t6.o9,
t4.o8.m11.t7.o10, t6.o9.m11.t7.o10, t1.o6.m12.t3.o7, t1.o6.m12.t4.o8,
t1.o6.m12.t6.o9, t1.o6.m12.t7.o10, t3.o7.m12.t4.o8, t3.o7.m12.t6.o9,
t3.o7.m12.t7.o10, t4.o8.m12.t6.o9, t4.o8.m12.t7.o10, t6.o9.m12.t7.o10/;

SET inter1(i,j,k,r,d,l)
/t1.o11.m21.(t2.o12.m21, t3.o13.m21, t4.o14.m21, t5.o15.m21, t6.o16.m21,
t7.o17.m21, t8.o18.m21),
t2.o12.m21.(t3.o13.m21, t4.o14.m21, t5.o15.m21, t6.o16.m21, t7.o17.m21,
t8.o18.m21),
t3.o13.m21.(t4.o14.m21, t5.o15.m21, t6.o16.m21, t7.o17.m21, t8.o18.m21),
t4.o14.m21.(t5.o15.m21, t6.o16.m21, t7.o17.m21, t8.o18.m21),
t5.o15.m21.(t6.o16.m21, t7.o17.m21, t8.o18.m21),
t6.o16.m21.(t7.o17.m21, t8.o18.m21), t7.o17.m21.t8.o18.m21,
t1.o1.m31.t4.o2.m31, t1.o3.m41.t4.o4.m41, t1.o3.m41.t6.o5.m41,
t4.o4.m41.t6.o5.m41/;

SET inter2(i,j,k,r,d,l)
/t1.o6.m11.(t3.o7.m11, t4.o8.m11, t6.o9.m11, t7.o10.m11),
t3.o7.m11.(t4.o8.m11, t6.o9.m11, t7.o10.m11),
t4.o8.m11.(t6.o9.m11, t7.o10.m11), t6.o9.m11.t7.o10.m11,
t1.o6.m12.(t3.o7.m12, t4.o8.m12, t6.o9.m12, t7.o10.m12),
t3.o7.m12.(t4.o8.m12, t6.o9.m12, t7.o10.m12),
t4.o8.m12.(t6.o9.m12, t7.o10.m12), t6.o9.m12.t7.o10.m12/;

SET ulti(i,j,k)
/t1.o11.m21, t2.o12.m21, t3.o13.m21, t4.o14.m21, t5.o15.m21,
t6.o16.m21, t7.o17.m21, t8.o18.m21/;

PARAMETER p(i,j,k) tiempo de proceso en minutos
/t1.o1.m31 10,
t1.o3.m41 15,

t1.o6.m11	30,	t1.o6.m12	30,
t1.o11.m21	5,		
t2.o12.m21	7,		
t3.o7.m11	25,	t3.o7.m12	25,
t3.o13.m21	5,		
t4.o2.m31	10,		
t4.o4.m41	15,		
t4.o8.m11	15,	t4.o8.m12	15,
t4.o14.m21	6,		
t5.o15.m21	3,		
t6.o5.m41	20,		
t6.o9.m11	30,	t6.o9.m12	30,
t6.o16.m21	4,		
t7.o10.m11	45,	t7.o10.m12	45,
t7.o17.m21	5,		
t8.o18.m21	3/;		

PARAMETER PL(i,j,k) Tiempo de proceso de lote

/t1.o1.m31	500,		
t1.o3.m41	630,		
t1.o6.m11	930,	t1.o6.m12	930,
t1.o11.m21	125,		
t2.o12.m21	130,		
t3.o7.m11	615,	t3.o7.m12	615,
t3.o13.m21	135,		
t4.o2.m31	660,		
t4.o4.m41	360,		
t4.o8.m11	540,	t4.o8.m12	540,
t4.o14.m21	90,		
t5.o15.m21	105,		
t6.o5.m41	740,		
t6.o9.m11	540,	t6.o9.m12	540,
t6.o16.m21	100,		
t7.o10.m11	1320,	t7.o10.m12	1320,
t7.o17.m21	160,		
t8.o18.m21	72/;		

PARAMETER TT(i,j,k) tiempo de lote de transferencia

/t1.o1.m31	500,		
t1.o3.m41	630,		
t1.o6.m11	930,	t1.o6.m12	930,
t3.o7.m11	615,	t3.o7.m12	615,
t4.o2.m31	660,		
t4.o4.m41	360,		
t4.o8.m11	540,	t4.o8.m12	540,
t6.o5.m41	740,		
t6.o9.m11	540,	t6.o9.m12	540,
t7.o10.m11	1320/;		

PARAMETER TT2(i,j,k) tiempo de lote de transferencia

/t1.o6.m11	930,	t1.o6.m12	930,
t1.o3.m41	630,		
t4.o8.m11	540,	t4.o8.m12	540,

t4.o2.m31 660,
t6.o5.m41 740,
t7.o10.m11 1320, t7.o10.m12 1320/;

SCALAR m valor maximo /4100/;
SCALAR a valor minimo /-4100/;
SCALAR b valor epsilon /1/;

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

VARIABLES t Makespan;

BINARY VARIABLES y(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) Restriccion de secuen1
R2(i,j,k,r,d,l) Restriccion de secuen2
R3(i,j,k,r,d,l) Restriccion de secuen3
R4(i,j,k,r,d,l) Restriccion de secuen4
R5(i,j,k,r,d,l) Restriccion de secuen5
R6(i,j,k,r,d,l) Restriccion de secuen6
R7(i,j,k,l) Restriccion aria
R8(i,j,k,r,d) Restriccion de binarias
R9(i,j,k,r,d) Restriccion de binarias
R10(i,j,k,r,d) Restriccion de binarias
R11(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter1
R12(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter1
R13(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter2
R14(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter2
R15(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter2
R16(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter2
R17(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter2
R18(i,j,k,r,d,l) Restriccion de inter2
R19(i,j,k) Restriccion ultimas operaciones;

$$R1(i,j,k,r,d,l) \$secuen1(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(\text{secuen1}(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) + TT(i,j,k)) = | = \text{sum}(\text{secuen1}(i,j,k,r,d,l), x(r,d,l));$$

$$R2(i,j,k,r,d,l) \$secuen2(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(\text{secuen2}(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) + TT2(i,j,k)) = | = \text{sum}(\text{secuen2}(i,j,k,r,d,l), x(r,d,l));$$

$$R3(i,j,k,r,d,l) \$secuen3(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(\text{secuen3}(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) + TT(i,j,k)) = | = \text{sum}(\text{secuen3}(i,j,k,r,d,l), x(r,d,l) + m*(1 - y(i,j,k)));$$

$$R4(i,j,k,r,d,l) \$secuen4(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(\text{secuen4}(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) + TT2(i,j,k)) = | = \text{sum}(\text{secuen4}(i,j,k,r,d,l), x(r,d,l) + m*(1 - y(i,j,k)));$$

$$R5(i,j,k,r,d,l) \$secuen5(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(\text{secuen5}(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) + TT(i,j,k)) = | = \text{sum}(\text{secuen5}(i,j,k,r,d,l), x(r,d,l) + m*(1 - y(r,d,l)));$$

$$R6(i,j,k,r,d,l) \$secuen6(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(\text{secuen6}(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) + TT2(i,j,k)) = | = \text{sum}(\text{secuen6}(i,j,k,r,d,l), x(r,d,l) + m*(1 - y(r,d,l)));$$

$$R7(i,j,k,l)\$aria(i,j,k,l).. \text{sum}(aria(i,j,k,l), y(i,j,k) + y(i,j,l))=e= 1;$$

$$R8(i,j,k,r,d)\$bin(i,j,k,r,d).. \text{sum}(bin(i,j,k,r,d), -y(i,j,k) +w(i,j,r,d,k)) =l= 0;$$

$$R9(i,j,k,r,d)\$bin(i,j,k,r,d).. \text{sum}(bin(i,j,k,r,d), -y(r,d,k) +w(i,j,r,d,k)) =l= 0;$$

$$R10(i,j,k,r,d)\$bin(i,j,k,r,d).. \text{sum}(bin(i,j,k,r,d), y(i,j,k) + y(r,d,k) - w(i,j,r,d,k)) =l= 1;$$

$$R11(i,j,k,r,d,l)\$inter1(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter1(i,j,k,r,d,l), m*z(i,j,r,d,k) + x(i,j,k) - x(r,d,l)) =g= PL(r,d,l);$$

$$R12(i,j,k,r,d,l)\$inter1(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter1(i,j,k,r,d,l), m*(1-z(i,j,r,d,k)) + x(r,d,l) - x(i,j,k)) =g= PL(i,j,k);$$

$$R13(i,j,k,r,d,l)\$inter2(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter2(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) -x(r,d,l) + a*u(i,j,r,d,k)) =g= PL(r,d,l) + a;$$

$$R14(i,j,k,r,d,l)\$inter2(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter2(i,j,k,r,d,l), x(i,j,k) -x(r,d,l)-(m+b)*u(i,j,r,d,k)) =l= PL(r,d,l) -b;$$

$$R15(i,j,k,r,d,l)\$inter2(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter2(i,j,k,r,d,l), x(r,d,l) -x(i,j,k) + a*v(i,j,r,d,k)) =g= PL(i,j,k) + a;$$

$$R16(i,j,k,r,d,l)\$inter2(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter2(i,j,k,r,d,l),x(r,d,l) -x(i,j,k)-(m+b)*v(i,j,r,d,k)) =l= PL(i,j,k) -b;$$

$$R17(i,j,k,r,d,l)\$inter2(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter2(i,j,k,r,d,l), w(i,j,r,d,k) + u(i,j,r,d,k) + v(i,j,r,d,k)) =l= 2;$$

$$R18(i,j,k,r,d,l)\$inter2(i,j,k,r,d,l).. \text{sum}(inter2(i,j,k,r,d,l), w(i,j,r,d,k) - u(i,j,r,d,k) - v(i,j,r,d,k)) =l= 0;$$

$$R19(i,j,k)\$ulti(i,j,k).. \text{sum}(ulti(i,j,k), x(i,j,k) +PL(i,j,k)) =l= t;$$

model tipo3 "Tercer modelo de la tesis" /ALL/;

tipo3.OPTFILE =1;

SOLVE tipo3 USIN

Anexo C
Parámetro PL para los casos de estudio

Parámetro PL para el nivel 2 de la demanda básica

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	100	1120
o3	60	15	100	1560
o6	240	30	66	2220
o11	60	5	33	225
o12	60	7	33	291
o7	240	25	34	1090
o13	60	5	34	230
o2	120	10	30	420
o4	60	15	15	285
o8	240	15	15	465
o14	60	6	7	102
o15	60	3	8	84
o5	60	20	15	360
o9	240	30	5	390
o16	60	4	5	80
o10	240	45	10	690
o17	60	5	5	85
o18	60	3	5	75

Parámetro PL para el nivel 3 de la demanda básica

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	15	270
o3	60	15	15	285
o6	240	30	10	540
o11	60	5	5	85
o12	60	7	5	95
o7	240	25	5	365
o13	60	5	5	85
o2	120	10	115	1270
o4	60	15	100	1560
o8	240	15	100	1740
o14	60	6	50	360
o15	60	3	50	210
o5	60	20	15	360
o9	240	30	5	390
o16	60	4	5	80
o10	240	45	10	690
o17	60	5	5	85
o18	60	3	5	75

Parámetro PL para el nivel 4 de la demanda básica

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	15	270
o3	60	15	15	285
o6	240	30	10	540
o11	60	5	5	85
o12	60	7	5	95
o7	240	25	5	365
o13	60	5	5	85
o2	120	10	115	1270
o4	60	15	15	285
o8	240	15	15	465
o14	60	6	7	102
o15	60	3	8	84
o5	60	20	100	2060
o9	240	30	33	1230
o16	60	4	33	192
o10	240	45	67	3255
o17	60	5	34	230
o18	60	3	33	159

Parámetro PL para el nivel 5 de la demanda básica

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	10	220
o3	60	15	10	210
o6	240	30	6	420
o11	60	5	3	75
o12	60	7	3	81
o7	240	25	4	340
o13	60	5	4	80
o2	120	10	120	1320
o4	60	15	60	960
o8	240	15	60	1140
o14	60	6	30	240
o15	60	3	30	150
o5	60	20	60	1260
o9	240	30	20	840
o16	60	4	20	140
o10	240	45	40	2040
o17	60	5	20	160
o18	60	3	20	120

Parámetro PL para el nivel 6 de la demanda básica

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	60	720
o3	60	15	60	960
o6	240	30	40	1440
o11	60	5	20	160
o12	60	7	20	200
o7	240	25	20	740
o13	60	5	20	160
o2	120	10	70	820
o4	60	15	10	210
o8	240	15	10	390
o14	60	6	5	90
o15	60	3	5	75
o5	60	20	60	1260
o9	240	30	20	840
o16	60	4	20	140
o10	240	45	40	2040
o17	60	5	20	160
o18	60	3	20	120

Parámetro PL para el nivel 7 de la demanda básica

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	60	720
o3	60	15	60	960
o6	240	30	40	1440
o11	60	5	20	160
o12	60	7	20	200
o7	240	25	20	740
o13	60	5	20	160
o2	120	10	70	820
o4	60	15	60	960
o8	240	15	60	1140
o14	60	6	30	240
o15	60	3	30	150
o5	60	20	10	260
o9	240	30	3	330
o16	60	4	3	72
o10	240	45	7	555
o17	60	5	4	80
o18	60	3	3	69

Parámetro PL para el nivel 1de la demanda básica X 10

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	380	3920
o3	60	15	380	5760
o6	240	30	230	7140
o11	60	5	130	710
o12	60	7	100	760
o7	240	25	150	3990
o13	60	5	150	810
o2	120	10	540	5520
o4	60	15	200	3060
o8	240	15	200	3240
o14	60	6	50	360
o15	60	3	150	510
o5	60	20	340	6860
o9	240	30	100	3240
o16	60	4	100	460
o10	240	45	240	11040
o17	60	5	200	1060
o18	60	3	40	180

Parámetro PL para el nivel 2 de la demanda básica X 10

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	1000	10120
o3	60	15	1000	15060
o6	240	30	660	20040
o11	60	5	330	1710
o12	60	7	330	2370
o7	240	25	340	8740
o13	60	5	340	1760
o2	120	10	300	3120
o4	60	15	150	2310
o8	240	15	150	2490
o14	60	6	70	480
o15	60	3	80	300
o5	60	20	150	3060
o9	240	30	50	1740
o16	60	4	50	260
o10	240	45	100	4740
o17	60	5	50	310
o18	60	3	50	210

Parámetro PL para el nivel 3 de la demanda básica X 10

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	150	1620
o3	60	15	150	2310
o6	240	30	100	3240
o11	60	5	50	310
o12	60	7	50	410
o7	240	25	50	1490
o13	60	5	50	310
o2	120	10	1150	11620
o4	60	15	1000	15060
o8	240	15	1000	15240
o14	60	6	500	3060
o15	60	3	500	1560
o5	60	20	150	3060
o9	240	30	50	1740
o16	60	4	50	260
o10	240	45	100	4740
o17	60	5	50	310
o18	60	3	50	210

Parámetro PL para el nivel 4 de la demanda básica X 10

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	150	1620
o3	60	15	150	2310
o6	240	30	100	3240
o11	60	5	50	310
o12	60	7	50	410
o7	240	25	50	1490
o13	60	5	50	310
o2	120	10	1150	11620
o4	60	15	150	2310
o8	240	15	150	2490
o14	60	6	70	480
o15	60	3	80	300
o5	60	20	1000	20060
o9	240	30	330	10140
o16	60	4	330	1380
o10	240	45	670	30390
o17	60	5	340	1760
o18	60	3	330	1050

Parámetro PL para el nivel 5 de la demanda básica X 10

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	100	1120
o3	60	15	100	1560
o6	240	30	60	2040
o11	60	5	30	210
o12	60	7	30	270
o7	240	25	40	1240
o13	60	5	40	260
o2	120	10	1200	12120
o4	60	15	600	9060
o8	240	15	600	9240
o14	60	6	300	1860
o15	60	3	300	960
o5	60	20	600	12060
o9	240	30	200	6240
o16	60	4	200	860
o10	240	45	400	18240
o17	60	5	200	1060
o18	60	3	200	660

Parámetro PL para el nivel 6 de la demanda básica X 10

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	600	6120
o3	60	15	600	9060
o6	240	30	400	12240
o11	60	5	200	1060
o12	60	7	200	1460
o7	240	25	200	5240
o13	60	5	200	1060
o2	120	10	700	7120
o4	60	15	100	1560
o8	240	15	100	1740
o14	60	6	50	360
o15	60	3	50	210
o5	60	20	600	12060
o9	240	30	200	6240
o16	60	4	200	860
o10	240	45	400	18240
o17	60	5	200	1060
o18	60	3	200	660

Parámetro PL para el nivel 7 de la demanda básica X 10

Operación	Tiempo de Preparación	Tiempo de Proceso	Demanda Total	PL
o1	120	10	600	6120
o3	60	15	600	9060
o6	240	30	400	12240
o11	60	5	200	1060
o12	60	7	200	1460
o7	240	25	200	5240
o13	60	5	200	1060
o2	120	10	700	7120
o4	60	15	600	9060
o8	240	15	600	9240
o14	60	6	300	1860
o15	60	3	300	960
o5	60	20	100	2060
o9	240	30	30	1140
o16	60	4	30	180
o10	240	45	70	3390
o17	60	5	40	260
o18	60	3	30	150

Anexo D

Parámetro TT y TT_2 para los casos de estudio

Casos m3-1-1-01 y m3-2-1-01Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	500		
t1.o3.m41	630		
t1.o6.m11	930	t1.o6.m12	930
t3.o7.m11	615	t3.o7.m12	615
t4.o2.m31	660		
t4.o4.m41	360		
t4.o8.m11	540	t4.o8.m12	540
t6.o5.m41	740		
t6.o9.m11	540	t6.o9.m12	540
t7.o10.m11	1320		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	930	t1.o6.m12	930
t1.o3.m41	630		
t4.o8.m11	540	t4.o8.m12	540
t4.o2.m31	660		
t6.o5.m41	740		
t7.o10.m11	1320	t7.o10.m12	1320

Casos m3-1-1-02 y m3-2-1-02Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1120		
t1.o3.m41	1560		
t1.o6.m11	2220	t1.o6.m12	2220
t3.o7.m11	1090	t3.o7.m12	1090
t4.o2.m31	420		
t4.o4.m41	285		
t4.o8.m11	465	t4.o8.m12	465
t6.o5.m41	360		
t6.o9.m11	390	t6.o9.m12	390
t7.o10.m11	690		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	2220	t1.o6.m12	2220
t1.o3.m41	1560		
t4.o8.m11	465	t4.o8.m12	465
t4.o2.m31	420		
t6.o5.m41	360		
t7.o10.m11	690	t7.o10.m12	690

Casos m3-1-1-03 y m3-2-1-03Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	270		
t1.o3.m41	285		
t1.o6.m11	540	t1.o6.m12	540
t3.o7.m11	365	t3.o7.m12	365
t4.o2.m31	1270		
t4.o4.m41	1560		
t4.o8.m11	1740	t4.o8.m12	1740
t6.o5.m41	360		
t6.o9.m11	390	t6.o9.m12	390
t7.o10.m11	690		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	540	t1.o6.m12	540
t1.o3.m41	285		
t4.o8.m11	1740	t4.o8.m12	1740
t4.o2.m31	1270		
t6.o5.m41	360		
t7.o10.m11	690	t7.o10.m12	690

Casos m3-1-1-04 y m3-2-1-04Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	270		
t1.o3.m41	285		
t1.o6.m11	540	t1.o6.m12	540
t3.o7.m11	365	t3.o7.m12	365
t4.o2.m31	1270		
t4.o4.m41	285		
t4.o8.m11	465	t4.o8.m12	465
t6.o5.m41	2060		
t6.o9.m11	1230	t6.o9.m12	1230
t7.o10.m11	3255		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	540	t1.o6.m12	540
t1.o3.m41	285		
t4.o8.m11	465	t4.o8.m12	465
t4.o2.m31	1270		
t6.o5.m41	2060		
t7.o10.m11	3255	t7.o10.m12	3255

Casos m3-1-1-05 y m3-2-1-05Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	220		
t1.o3.m41	210		
t1.o6.m11	420	t1.o6.m12	420
t3.o7.m11	340	t3.o7.m12	340
t4.o2.m31	1320		
t4.o4.m41	960		
t4.o8.m11	1140	t4.o8.m12	1140
t6.o5.m41	1260		
t6.o9.m11	840	t6.o9.m12	840
t7.o10.m11	2040		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	420	t1.o6.m12	420
t1.o3.m41	210		
t4.o8.m11	1140	t4.o8.m12	1140
t4.o2.m31	1320		
t6.o5.m41	1260		
t7.o10.m11	2040	t7.o10.m12	2040

Casos m3-1-1-06 y m3-2-1-06Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	720		
t1.o3.m41	960		
t1.o6.m11	1440	t1.o6.m12	1440
t3.o7.m11	740	t3.o7.m12	740
t4.o2.m31	820		
t4.o4.m41	210		
t4.o8.m11	390	t4.o8.m12	390
t6.o5.m41	1260		
t6.o9.m11	840	t6.o9.m12	840
t7.o10.m11	2040		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1440	t1.o6.m12	1440
t1.o3.m41	960		
t4.o8.m11	390	t4.o8.m12	390
t4.o2.m31	820		
t6.o5.m41	1260		
t7.o10.m11	2040	t7.o10.m12	2040

Casos m3-1-1-07 y m3-2-1-07Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	720		
t1.o3.m41	960		
t1.o6.m11	1440	t1.o6.m12	1440
t3.o7.m11	740	t3.o7.m12	740
t4.o2.m31	820		
t4.o4.m41	960		
t4.o8.m11	1140	t4.o8.m12	1140
t6.o5.m41	260		
t6.o9.m11	330	t6.o9.m12	330
t7.o10.m11	555		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1440	t1.o6.m12	1440
t1.o3.m41	960		
t4.o8.m11	1140	t4.o8.m12	1140
t4.o2.m31	820		
t6.o5.m41	260		
t7.o10.m11	555	t7.o10.m12	555

Casos m3-1-2-01 y m3-2-2-01Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	440		
t1.o3.m41	390		
t1.o6.m11	870	t1.o6.m12	870
t3.o7.m11	555	t3.o7.m12	555
t4.o2.m31	600		
t4.o4.m41	120		
t4.o8.m11	480	t4.o8.m12	480
t6.o5.m41	500		
t6.o9.m11	480	t6.o9.m12	480
t7.o10.m11	1260		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	870	t1.o6.m12	870
t1.o3.m41	390		
t4.o8.m11	480	t4.o8.m12	480
t4.o2.m31	600		
t6.o5.m41	500		
t7.o10.m11	1260	t7.o10.m12	1260

Casos m3-1-2-02 y m3-2-2-02

Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1060		
t1.o3.m41	1320		
t1.o6.m11	2160	t1.o6.m12	2160
t3.o7.m11	1030	t3.o7.m12	1030
t4.o2.m31	360		
t4.o4.m41	45		
t4.o8.m11	405	t4.o8.m12	405
t6.o5.m41	120		
t6.o9.m11	330	t6.o9.m12	330
t7.o10.m11	630		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	2160	t1.o6.m12	2160
t1.o3.m41	1320		
t4.o8.m11	405	t4.o8.m12	405
t4.o2.m31	360		
t6.o5.m41	120		
t7.o10.m11	630	t7.o10.m12	630

Casos m3-1-2-03 y m3-2-2-03

Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	210		
t1.o3.m41	45		
t1.o6.m11	480	t1.o6.m12	480
t3.o7.m11	305	t3.o7.m12	305
t4.o2.m31	1210		
t4.o4.m41	1320		
t4.o8.m11	1680	t4.o8.m12	1680
t6.o5.m41	120		
t6.o9.m11	330	t6.o9.m12	330
t7.o10.m11	630		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	480	t1.o6.m12	480
t1.o3.m41	45		
t4.o8.m11	1680	t4.o8.m12	1680
t4.o2.m31	1210		
t6.o5.m41	120		
t7.o10.m11	630	t7.o10.m12	630

Casos m3-1-2-04 y m3-2-2-04Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	210		
t1.o3.m41	45		
t1.o6.m11	480	t1.o6.m12	480
t3.o7.m11	305	t3.o7.m12	305
t4.o2.m31	1210		
t4.o4.m41	45		
t4.o8.m11	405	t4.o8.m12	405
t6.o5.m41	1820		
t6.o9.m11	1170	t6.o9.m12	1170
t7.o10.m11	3195		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	480	t1.o6.m12	480
t1.o3.m41	45		
t4.o8.m11	405	t4.o8.m12	405
t4.o2.m31	1210		
t6.o5.m41	1820		
t7.o10.m11	3195	t7.o10.m12	3195

Casos m3-1-2-05 y m3-2-2-05Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	160		
t1.o3.m41	-30		
t1.o6.m11	360	t1.o6.m12	360
t3.o7.m11	280	t3.o7.m12	280
t4.o2.m31	1260		
t4.o4.m41	720		
t4.o8.m11	1080	t4.o8.m12	1080
t6.o5.m41	1020		
t6.o9.m11	780	t6.o9.m12	780
t7.o10.m11	1980		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	360	t1.o6.m12	360
t1.o3.m41	-30		
t4.o8.m11	1080	t4.o8.m12	1080
t4.o2.m31	1260		
t6.o5.m41	1020		
t7.o10.m11	1980	t7.o10.m12	1980

Casos m3-1-2-06 y m3-2-2-06

Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	660		
t1.o3.m41	720		
t1.o6.m11	1380	t1.o6.m12	1380
t3.o7.m11	680	t3.o7.m12	680
t4.o2.m31	760		
t4.o4.m41	-30		
t4.o8.m11	330	t4.o8.m12	330
t6.o5.m41	1020		
t6.o9.m11	780	t6.o9.m12	780
t7.o10.m11	1980		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1380	t1.o6.m12	1380
t1.o3.m41	720		
t4.o8.m11	330	t4.o8.m12	330
t4.o2.m31	760		
t6.o5.m41	1020		
t7.o10.m11	1980	t7.o10.m12	1980

Casos m3-1-2-07 y m3-2-2-07

Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	660		
t1.o3.m41	720		
t1.o6.m11	1380	t1.o6.m12	1380
t3.o7.m11	680	t3.o7.m12	680
t4.o2.m31	760		
t4.o4.m41	720		
t4.o8.m11	1080	t4.o8.m12	1080
t6.o5.m41	20		
t6.o9.m11	270	t6.o9.m12	270
t7.o10.m11	495		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1380	t1.o6.m12	1380
t1.o3.m41	720		
t4.o8.m11	1080	t4.o8.m12	1080
t4.o2.m31	760		
t6.o5.m41	20		
t7.o10.m11	495	t7.o10.m12	495

Casos m3-1-3-01 y m3-2-3-01Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	250		
t1.o3.m41	105		
t1.o6.m11	810	t1.o6.m12	810
t3.o7.m11	485	t3.o7.m12	485
t4.o2.m31	315		
t4.o4.m41	-30		
t4.o8.m11	456	t4.o8.m12	456
t6.o5.m41	230		
t6.o9.m11	444	t6.o9.m12	444
t7.o10.m11	1165		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	807	t1.o6.m12	807
t1.o3.m41	40		
t4.o8.m11	438	t4.o8.m12	438
t4.o2.m31	330		
t6.o5.m41	160		
t7.o10.m11	1251	t7.o10.m12	1251

Casos m3-1-3-02 y m3-2-3-02Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	560		
t1.o3.m41	570		
t1.o6.m11	2000	t1.o6.m12	2000
t3.o7.m11	865	t3.o7.m12	865
t4.o2.m31	150		
t4.o4.m41	-68		
t4.o8.m11	369	t4.o8.m12	369
t6.o5.m41	0		
t6.o9.m11	314	t6.o9.m12	314
t7.o10.m11	610		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1936	t1.o6.m12	1936
t1.o3.m41	495		
t4.o8.m11	384	t4.o8.m12	384
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	-30		
t7.o10.m11	618	t7.o10.m12	618

Casos m3-1-3-03 y m3-2-3-03Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	135		
t1.o3.m41	-68		
t1.o6.m11	460	t1.o6.m12	460
t3.o7.m11	285	t3.o7.m12	285
t4.o2.m31	635		
t4.o4.m41	570		
t4.o8.m11	1386	t4.o8.m12	1386
t6.o5.m41	0		
t6.o9.m11	314	t6.o9.m12	314
t7.o10.m11	610		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	452	t1.o6.m12	452
t1.o3.m41	-55		
t4.o8.m11	1533	t4.o8.m12	1533
t4.o2.m31	930		
t6.o5.m41	-30		
t7.o10.m11	618	t7.o10.m12	618

Casos m3-1-3-04 y m3-2-3-04Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	135		
t1.o3.m41	-68		
t1.o6.m11	460	t1.o6.m12	460
t3.o7.m11	285	t3.o7.m12	285
t4.o2.m31	1000		
t4.o4.m41	-68		
t4.o8.m11	369	t4.o8.m12	369
t6.o5.m41	860		
t6.o9.m11	1042	t6.o9.m12	1042
t7.o10.m11	3030		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	452	t1.o6.m12	452
t1.o3.m41	-68		
t4.o8.m11	384	t4.o8.m12	384
t4.o2.m31	635		
t6.o5.m41	820		
t7.o10.m11	3099	t7.o10.m12	3099

Casos m3-1-3-05 y m3-2-3-05Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	110		
t1.o3.m41	-105		
t1.o6.m11	350	t1.o6.m12	350
t3.o7.m11	265	t3.o7.m12	265
t4.o2.m31	375		
t4.o4.m41	270		
t4.o8.m11	906	t4.o8.m12	906
t6.o5.m41	450		
t6.o9.m11	704	t6.o9.m12	704
t7.o10.m11	1885		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	346	t1.o6.m12	346
t1.o3.m41	-105		
t4.o8.m11	993	t4.o8.m12	993
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	420		
t7.o10.m11	1923	t7.o10.m12	1923

Casos m3-1-3-06 y m3-2-3-06Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	360		
t1.o3.m41	270		
t1.o6.m11	1285	t1.o6.m12	1285
t3.o7.m11	585	t3.o7.m12	585
t4.o2.m31	625		
t4.o4.m41	-105		
t4.o8.m11	306	t4.o8.m12	306
t6.o5.m41	450		
t6.o9.m11	704	t6.o9.m12	704
t7.o10.m11	1885		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1247	t1.o6.m12	1247
t1.o3.m41	245		
t4.o8.m11	318	t4.o8.m12	318
t4.o2.m31	410		
t6.o5.m41	420		
t7.o10.m11	1923	t7.o10.m12	1923

Casos m3-1-3-07 y m3-2-3-07Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	360		
t1.o3.m41	270		
t1.o6.m11	1285	t1.o6.m12	1285
t3.o7.m11	585	t3.o7.m12	585
t4.o2.m31	410		
t4.o4.m41	270		
t4.o8.m11	906	t4.o8.m12	906
t6.o5.m41	-40		
t6.o9.m11	262	t6.o9.m12	262
t7.o10.m11	480		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1247	t1.o6.m12	1247
t1.o3.m41	270		
t4.o8.m11	993	t4.o8.m12	993
t4.o2.m31	580		
t6.o5.m41	-80		
t7.o10.m11	489	t7.o10.m12	489

Casos m3-1-4-01 y m3-2-4-01Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	810	t1.o6.m12	810
t3.o7.m11	485	t3.o7.m12	485
t4.o2.m31	315		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	456	t4.o8.m12	456
t6.o5.m41	230		
t6.o9.m11	444	t6.o9.m12	444
t7.o10.m11	1165		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	807	t1.o6.m12	807
t1.o3.m41	40		
t4.o8.m11	438	t4.o8.m12	438
t4.o2.m31	70		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	1251	t7.o10.m12	1251

Casos m3-1-4-02 y m3-2-4-02Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	2000	t1.o6.m12	2000
t3.o7.m11	865	t3.o7.m12	865
t4.o2.m31	150		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	369	t4.o8.m12	369
t6.o5.m41	0		
t6.o9.m11	314	t6.o9.m12	314
t7.o10.m11	610		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1936	t1.o6.m12	1936
t1.o3.m41	495		
t4.o8.m11	384	t4.o8.m12	384
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	618	t7.o10.m12	618

Casos m3-1-4-03 y m3-2-4-03Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	460	t1.o6.m12	460
t3.o7.m11	285	t3.o7.m12	285
t4.o2.m31	70		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	1386	t4.o8.m12	1386
t6.o5.m41	0		
t6.o9.m11	314	t6.o9.m12	314
t7.o10.m11	610		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	452	t1.o6.m12	452
t1.o3.m41	-55		
t4.o8.m11	1533	t4.o8.m12	1533
t4.o2.m31	930		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	618	t7.o10.m12	618

Casos m3-1-4-04 y m3-2-4-04Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	460	t1.o6.m12	460
t3.o7.m11	285	t3.o7.m12	285
t4.o2.m31	1000		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	369	t4.o8.m12	369
t6.o5.m41	860		
t6.o9.m11	1042	t6.o9.m12	1042
t7.o10.m11	3030		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	452	t1.o6.m12	452
t1.o3.m41	-55		
t4.o8.m11	384	t4.o8.m12	384
t4.o2.m31	70		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	3099	t7.o10.m12	3099

Casos m3-1-4-05 y m3-2-4-05Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	350	t1.o6.m12	350
t3.o7.m11	265	t3.o7.m12	265
t4.o2.m31	375		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	906	t4.o8.m12	906
t6.o5.m41	450		
t6.o9.m11	704	t6.o9.m12	704
t7.o10.m11	1885		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	346	t1.o6.m12	346
t1.o3.m41	-105		
t4.o8.m11	993	t4.o8.m12	993
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	1923	t7.o10.m12	1923

Casos m3-1-4-06 y m3-2-4-06Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	1285	t1.o6.m12	1285
t3.o7.m11	585	t3.o7.m12	585
t4.o2.m31	625		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	306	t4.o8.m12	306
t6.o5.m41	450		
t6.o9.m11	704	t6.o9.m12	704
t7.o10.m11	1885		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1247	t1.o6.m12	1247
t1.o3.m41	245		
t4.o8.m11	318	t4.o8.m12	318
t4.o2.m31	70		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	1923	t7.o10.m12	1923

Casos m3-1-4-07 y m3-2-4-07Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	1285	t1.o6.m12	1285
t3.o7.m11	585	t3.o7.m12	585
t4.o2.m31	70		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	906	t4.o8.m12	906
t6.o5.m41	-40		
t6.o9.m11	262	t6.o9.m12	262
t7.o10.m11	480		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1247	t1.o6.m12	1247
t1.o3.m41	245		
t4.o8.m11	993	t4.o8.m12	993
t4.o2.m31	580		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	489	t7.o10.m12	489

Casos m3-1-1-11 y m3-2-1-11

Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	3920		
t1.o3.m41	5760		
t1.o6.m11	7140	t1.o6.m12	7140
t3.o7.m11	3990	t3.o7.m12	3990
t4.o2.m31	5520		
t4.o4.m41	3060		
t4.o8.m11	3240	t4.o8.m12	3240
t6.o5.m41	6860		
t6.o9.m11	3240	t6.o9.m12	3240
t7.o10.m11	11040		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	7140	t1.o6.m12	7140
t1.o3.m41	5760		
t4.o8.m11	3240	t4.o8.m12	3240
t4.o2.m31	5520		
t6.o5.m41	6860		
t7.o10.m11	11040	t7.o10.m12	11040

Casos m3-1-1-12 y m3-2-1-12

Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	10120		
t1.o3.m41	15060		
t1.o6.m11	20040	t1.o6.m12	20040
t3.o7.m11	8740	t3.o7.m12	8740
t4.o2.m31	3120		
t4.o4.m41	2310		
t4.o8.m11	2490	t4.o8.m12	2490
t6.o5.m41	3060		
t6.o9.m11	1740	t6.o9.m12	1740
t7.o10.m11	4740		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	20040	t1.o6.m12	20040
t1.o3.m41	15060		
t4.o8.m11	2490	t4.o8.m12	2490
t4.o2.m31	3120		
t6.o5.m41	3060		
t7.o10.m11	4740	t7.o10.m12	4740

Casos m3-1-1-13 y m3-2-1-13Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1620		
t1.o3.m41	2310		
t1.o6.m11	3240	t1.o6.m12	3240
t3.o7.m11	1490	t3.o7.m12	1490
t4.o2.m31	11620		
t4.o4.m41	15060		
t4.o8.m11	15240	t4.o8.m12	15240
t6.o5.m41	3060		
t6.o9.m11	1740	t6.o9.m12	1740
t7.o10.m11	4740		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	3240	t1.o6.m12	3240
t1.o3.m41	2310		
t4.o8.m11	15240	t4.o8.m12	15240
t4.o2.m31	11620		
t6.o5.m41	3060		
t7.o10.m11	4740	t7.o10.m12	4740

Casos m3-1-1-14 y m3-2-1-14Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1620		
t1.o3.m41	2310		
t1.o6.m11	3240	t1.o6.m12	3240
t3.o7.m11	1490	t3.o7.m12	1490
t4.o2.m31	11620		
t4.o4.m41	2310		
t4.o8.m11	2490	t4.o8.m12	2490
t6.o5.m41	20060		
t6.o9.m11	10140	t6.o9.m12	10140
t7.o10.m11	30390		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	3240	t1.o6.m12	3240
t1.o3.m41	2310		
t4.o8.m11	2490	t4.o8.m12	2490
t4.o2.m31	11620		
t6.o5.m41	20060		
t7.o10.m11	30390	t7.o10.m12	30390

Casos m3-1-1-15 y m3-2-1-15Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1120		
t1.o3.m41	1560		
t1.o6.m11	2040	t1.o6.m12	2040
t3.o7.m11	1240	t3.o7.m12	1240
t4.o2.m31	12120		
t4.o4.m41	9060		
t4.o8.m11	9240	t4.o8.m12	9240
t6.o5.m41	12060		
t6.o9.m11	6240	t6.o9.m12	6240
t7.o10.m11	18240		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	2040	t1.o6.m12	2040
t1.o3.m41	1560		
t4.o8.m11	9240	t4.o8.m12	9240
t4.o2.m31	12120		
t6.o5.m41	12060		
t7.o10.m11	18240	t7.o10.m12	18240

Casos m3-1-1-16 y m3-2-1-16Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	6120		
t1.o3.m41	9060		
t1.o6.m11	12240	t1.o6.m12	12240
t3.o7.m11	5240	t3.o7.m12	5240
t4.o2.m31	7120		
t4.o4.m41	1560		
t4.o8.m11	1740	t4.o8.m12	1740
t6.o5.m41	12060		
t6.o9.m11	6240	t6.o9.m12	6240
t7.o10.m11	18240		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	12240	t1.o6.m12	12240
t1.o3.m41	9060		
t4.o8.m11	1740	t4.o8.m12	1740
t4.o2.m31	7120		
t6.o5.m41	12060		
t7.o10.m11	18240	t7.o10.m12	18240

Casos m3-1-1-17 y m3-2-1-17Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	6120		
t1.o3.m41	9060		
t1.o6.m11	12240	t1.o6.m12	12240
t3.o7.m11	5240	t3.o7.m12	5240
t4.o2.m31	7120		
t4.o4.m41	9060		
t4.o8.m11	9240	t4.o8.m12	9240
t6.o5.m41	2060		
t6.o9.m11	1140	t6.o9.m12	1140
t7.o10.m11	3390		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	12240	t1.o6.m12	12240
t1.o3.m41	9060		
t4.o8.m11	9240	t4.o8.m12	9240
t4.o2.m31	7120		
t6.o5.m41	2060		
t7.o10.m11	3390	t7.o10.m12	3390

Casos m3-1-2-11 y m3-2-2-11Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	3860		
t1.o3.m41	5520		
t1.o6.m11	7080	t1.o6.m12	7080
t3.o7.m11	3930	t3.o7.m12	3930
t4.o2.m31	5460		
t4.o4.m41	2820		
t4.o8.m11	3180	t4.o8.m12	3180
t6.o5.m41	6620		
t6.o9.m11	3180	t6.o9.m12	3180
t7.o10.m11	10980		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	7080	t1.o6.m12	7080
t1.o3.m41	5520		
t4.o8.m11	3180	t4.o8.m12	3180
t4.o2.m31	5460		
t6.o5.m41	6620		
t7.o10.m11	10980	t7.o10.m12	10980

Casos m3-1-2-12 y m3-2-2-12Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	10060		
t1.o3.m41	14820		
t1.o6.m11	19980	t1.o6.m12	19980
t3.o7.m11	8680	t3.o7.m12	8680
t4.o2.m31	3060		
t4.o4.m41	2070		
t4.o8.m11	2430	t4.o8.m12	2430
t6.o5.m41	2820		
t6.o9.m11	1680	t6.o9.m12	1680
t7.o10.m11	4680		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	19980	t1.o6.m12	19980
t1.o3.m41	14820		
t4.o8.m11	2430	t4.o8.m12	2430
t4.o2.m31	3060		
t6.o5.m41	2820		
t7.o10.m11	4680	t7.o10.m12	4680

Casos m3-1-2-13 y m3-2-2-13Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1560		
t1.o3.m41	2070		
t1.o6.m11	3180	t1.o6.m12	3180
t3.o7.m11	1430	t3.o7.m12	1430
t4.o2.m31	11560		
t4.o4.m41	14820		
t4.o8.m11	15180	t4.o8.m12	15180
t6.o5.m41	2820		
t6.o9.m11	1680	t6.o9.m12	1680
t7.o10.m11	4680		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	3180	t1.o6.m12	3180
t1.o3.m41	2070		
t4.o8.m11	15180	t4.o8.m12	15180
t4.o2.m31	11560		
t6.o5.m41	2820		
t7.o10.m11	4680	t7.o10.m12	4680

Casos m3-1-2-14 y m3-2-2-14Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1560		
t1.o3.m41	2070		
t1.o6.m11	3180	t1.o6.m12	3180
t3.o7.m11	1430	t3.o7.m12	1430
t4.o2.m31	11560		
t4.o4.m41	2070		
t4.o8.m11	2430	t4.o8.m12	2430
t6.o5.m41	19820		
t6.o9.m11	10080	t6.o9.m12	10080
t7.o10.m11	30330		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	3180	t1.o6.m12	3180
t1.o3.m41	2070		
t4.o8.m11	2430	t4.o8.m12	2430
t4.o2.m31	11560		
t6.o5.m41	19820		
t7.o10.m11	30330	t7.o10.m12	30330

Casos m3-1-2-15 y m3-2-2-15Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1060		
t1.o3.m41	1320		
t1.o6.m11	1980	t1.o6.m12	1980
t3.o7.m11	1180	t3.o7.m12	1180
t4.o2.m31	12060		
t4.o4.m41	8820		
t4.o8.m11	9180	t4.o8.m12	9180
t6.o5.m41	11820		
t6.o9.m11	6180	t6.o9.m12	6180
t7.o10.m11	18180		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1980	t1.o6.m12	1980
t1.o3.m41	1320		
t4.o8.m11	9180	t4.o8.m12	9180
t4.o2.m31	12060		
t6.o5.m41	11820		
t7.o10.m11	18180	t7.o10.m12	18180

Casos m3-1-2-16 y m3-2-2-16Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	6060		
t1.o3.m41	8820		
t1.o6.m11	12180	t1.o6.m12	12180
t3.o7.m11	5180	t3.o7.m12	5180
t4.o2.m31	7060		
t4.o4.m41	1320		
t4.o8.m11	1680	t4.o8.m12	1680
t6.o5.m41	11820		
t6.o9.m11	6180	t6.o9.m12	6180
t7.o10.m11	18180		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	12180	t1.o6.m12	12180
t1.o3.m41	8820		
t4.o8.m11	1680	t4.o8.m12	1680
t4.o2.m31	7060		
t6.o5.m41	11820		
t7.o10.m11	18180	t7.o10.m12	18180

Casos m3-1-2-17 y m3-2-2-17Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	6060		
t1.o3.m41	8820		
t1.o6.m11	12180	t1.o6.m12	12180
t3.o7.m11	5180	t3.o7.m12	5180
t4.o2.m31	7060		
t4.o4.m41	8820		
t4.o8.m11	9180	t4.o8.m12	9180
t6.o5.m41	1820		
t6.o9.m11	1080	t6.o9.m12	1080
t7.o10.m11	3330		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	12180	t1.o6.m12	12180
t1.o3.m41	8820		
t4.o8.m11	9180	t4.o8.m12	9180
t4.o2.m31	7060		
t6.o5.m41	1820		
t7.o10.m11	3330	t7.o10.m12	3330

Casos m3-1-3-11 y m3-2-3-11Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	1960		
t1.o3.m41	2670		
t1.o6.m11	6435	t1.o6.m12	6435
t3.o7.m11	3185	t3.o7.m12	3185
t4.o2.m31	2475		
t4.o4.m41	1320		
t4.o8.m11	2886	t4.o8.m12	2886
t6.o5.m41	3650		
t6.o9.m11	2784	t6.o9.m12	2784
t7.o10.m11	9985		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	6387	t1.o6.m12	6387
t1.o3.m41	1795		
t4.o8.m11	2733	t4.o8.m12	2733
t4.o2.m31	2760		
t6.o5.m41	3220		
t7.o10.m11	10863	t7.o10.m12	10863

Casos m3-1-3-12 y m3-2-3-12Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	5060		
t1.o3.m41	7320		
t1.o6.m11	18335	t1.o6.m12	18335
t3.o7.m11	6985	t3.o7.m12	6985
t4.o2.m31	825		
t4.o4.m41	945		
t4.o8.m11	2016	t4.o8.m12	2016
t6.o5.m41	1350		
t6.o9.m11	1484	t6.o9.m12	1484
t7.o10.m11	4435		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	17677	t1.o6.m12	17677
t1.o3.m41	6345		
t4.o8.m11	2193	t4.o8.m12	2193
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	1320		
t7.o10.m11	4533	t7.o10.m12	4533

Casos m3-1-3-13 y m3-2-3-13Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	810		
t1.o3.m41	945		
t1.o6.m11	2935	t1.o6.m12	2935
t3.o7.m11	1185	t3.o7.m12	1185
t4.o2.m31	5810		
t4.o4.m41	7320		
t4.o8.m11	12186	t4.o8.m12	12186
t6.o5.m41	1350		
t6.o9.m11	1484	t6.o9.m12	1484
t7.o10.m11	4435		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	2837	t1.o6.m12	2837
t1.o3.m41	845		
t4.o8.m11	13683	t4.o8.m12	13683
t4.o2.m31	8580		
t6.o5.m41	1320		
t7.o10.m11	4533	t7.o10.m12	4533

Casos m3-1-3-14 y m3-2-3-14Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	810		
t1.o3.m41	945		
t1.o6.m11	2935	t1.o6.m12	2935
t3.o7.m11	1185	t3.o7.m12	1185
t4.o2.m31	9325		
t4.o4.m41	945		
t4.o8.m11	2016	t4.o8.m12	2016
t6.o5.m41	9950		
t6.o9.m11	8764	t6.o9.m12	8764
t7.o10.m11	28635		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	2837	t1.o6.m12	2837
t1.o3.m41	845		
t4.o8.m11	2193	t4.o8.m12	2193
t4.o2.m31	5810		
t6.o5.m41	9820		
t7.o10.m11	29343	t7.o10.m12	29343

Casos m3-1-3-15 y m3-2-3-15Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	560		
t1.o3.m41	570		
t1.o6.m11	1835	t1.o6.m12	1835
t3.o7.m11	985	t3.o7.m12	985
t4.o2.m31	3075		
t4.o4.m41	4320		
t4.o8.m11	7386	t4.o8.m12	7386
t6.o5.m41	5850		
t6.o9.m11	5384	t6.o9.m12	5384
t7.o10.m11	17185		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1777	t1.o6.m12	1777
t1.o3.m41	345		
t4.o8.m11	8283	t4.o8.m12	8283
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	5820		
t7.o10.m11	17583	t7.o10.m12	17583

Casos m3-1-3-16 y m3-2-3-16Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	3060		
t1.o3.m41	4320		
t1.o6.m11	11185	t1.o6.m12	11185
t3.o7.m11	4185	t3.o7.m12	4185
t4.o2.m31	5575		
t4.o4.m41	570		
t4.o8.m11	1386	t4.o8.m12	1386
t6.o5.m41	5850		
t6.o9.m11	5384	t6.o9.m12	5384
t7.o10.m11	17185		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	10787	t1.o6.m12	10787
t1.o3.m41	3845		
t4.o8.m11	1533	t4.o8.m12	1533
t4.o2.m31	3560		
t6.o5.m41	5820		
t7.o10.m11	17583	t7.o10.m12	17583

Casos m3-1-3-17 y m3-2-3-17Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	3060		
t1.o3.m41	4320		
t1.o6.m11	11185	t1.o6.m12	11185
t3.o7.m11	4185	t3.o7.m12	4185
t4.o2.m31	3560		
t4.o4.m41	4320		
t4.o8.m11	7386	t4.o8.m12	7386
t6.o5.m41	950		
t6.o9.m11	964	t6.o9.m12	964
t7.o10.m11	3135		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	10787	t1.o6.m12	10787
t1.o3.m41	3845		
t4.o8.m11	8283	t4.o8.m12	8283
t4.o2.m31	5080		
t6.o5.m41	820		
t7.o10.m11	3243	t7.o10.m12	3243

Casos m3-1-4-11 y m3-2-4-11Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	6435	t1.o6.m12	6435
t3.o7.m11	3185	t3.o7.m12	3185
t4.o2.m31	2475		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	2886	t4.o8.m12	2886
t6.o5.m41	3650		
t6.o9.m11	2784	t6.o9.m12	2784
t7.o10.m11	9985		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	6387	t1.o6.m12	6387
t1.o3.m41	1795		
t4.o8.m11	2733	t4.o8.m12	2733
t4.o2.m31	70		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	10863	t7.o10.m12	10863

Casos m3-1-4-12 y m3-2-4-12Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	18335	t1.o6.m12	18335
t3.o7.m11	6985	t3.o7.m12	6985
t4.o2.m31	825		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	2016	t4.o8.m12	2016
t6.o5.m41	1350		
t6.o9.m11	1484	t6.o9.m12	1484
t7.o10.m11	4435		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	17677	t1.o6.m12	17677
t1.o3.m41	6345		
t4.o8.m11	2193	t4.o8.m12	2193
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	4533	t7.o10.m12	4533

Casos m3-1-4-13 y m3-2-4-13Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	2935	t1.o6.m12	2935
t3.o7.m11	1185	t3.o7.m12	1185
t4.o2.m31	70		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	12186	t4.o8.m12	12186
t6.o5.m41	1350		
t6.o9.m11	1484	t6.o9.m12	1484
t7.o10.m11	4435		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	2837	t1.o6.m12	2837
t1.o3.m41	845		
t4.o8.m11	13683	t4.o8.m12	13683
t4.o2.m31	8580		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	4533	t7.o10.m12	4533

Casos m3-1-4-14 y m3-2-4-14Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	2935	t1.o6.m12	2935
t3.o7.m11	1185	t3.o7.m12	1185
t4.o2.m31	9325		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	2016	t4.o8.m12	2016
t6.o5.m41	9950		
t6.o9.m11	8764	t6.o9.m12	8764
t7.o10.m11	28635		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	2837	t1.o6.m12	2837
t1.o3.m41	845		
t4.o8.m11	2193	t4.o8.m12	2193
t4.o2.m31	70		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	29343	t7.o10.m12	29343

Casos m3-1-4-15 y m3-2-4-15Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	1835	t1.o6.m12	1835
t3.o7.m11	985	t3.o7.m12	985
t4.o2.m31	3075		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	7386	t4.o8.m12	7386
t6.o5.m41	5850		
t6.o9.m11	5384	t6.o9.m12	5384
t7.o10.m11	17185		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	1777	t1.o6.m12	1777
t1.o3.m41	345		
t4.o8.m11	8283	t4.o8.m12	8283
t4.o2.m31	80		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	17583	t7.o10.m12	17583

Casos m3-1-4-16 y m3-2-4-16Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	11185	t1.o6.m12	11185
t3.o7.m11	4185	t3.o7.m12	4185
t4.o2.m31	5575		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	1386	t4.o8.m12	1386
t6.o5.m41	5850		
t6.o9.m11	5384	t6.o9.m12	5384
t7.o10.m11	17185		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	10787	t1.o6.m12	10787
t1.o3.m41	3845		
t4.o8.m11	1533	t4.o8.m12	1533
t4.o2.m31	70		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	17583	t7.o10.m12	17583

Casos m3-1-4-17 y m3-2-4-17Parámetro TT

Nombre	Tiempo LT		
t1.o1.m31	70		
t1.o3.m41	-165		
t1.o6.m11	11185	t1.o6.m12	11185
t3.o7.m11	4185	t3.o7.m12	4185
t4.o2.m31	70		
t4.o4.m41	-165		
t4.o8.m11	7386	t4.o8.m12	7386
t6.o5.m41	950		
t6.o9.m11	964	t6.o9.m12	964
t7.o10.m11	3135		

Parámetro TT2

Nombre	Tiempo LT		
t1.o6.m11	10787	t1.o6.m12	10787
t1.o3.m41	3845		
t4.o8.m11	8283	t4.o8.m12	8283
t4.o2.m31	5080		
t6.o5.m41	-160		
t7.o10.m11	3243	t7.o10.m12	3243

Anexo E

Asignación de turnos para el lanzamiento de los casos en Gams/Cplex

En Excel, por medio de la generación de números randómicos, se asignaron turnos de corrida para los casos de cada medida de eficacia. Para cada uno se produjo un número entre cero y uno con la función “aleatorio”, luego estos números se multiplicaron por 56 y finalmente se les aplicó la función “redondear” para aproximarlos al entero siguiente, siendo éste, el turno correspondiente. Los resultados de este procedimiento aparecen en las siguientes tablas.

Asignación de turnos para los casos del *makespan*

Código	# rand.	# ran. X 56	Entero (turno)	Código	# rand.	# ran. X 56	Entero (turno)
m3-1-1-06	0,039	2,207	3	m3-1-3-11	0,413	23,120	24
m3-1-4-07	0,045	2,521	3	m3-1-3-07	0,434	24,302	25
m3-1-1-12	0,051	2,862	3	m3-1-1-14	0,437	24,492	25
m3-1-2-11	0,058	3,258	4	m3-1-4-17	0,444	24,876	25
m3-1-1-02	0,090	5,024	6	m3-1-4-11	0,527	29,523	30
m3-1-3-14	0,117	6,563	7	m3-1-1-05	0,541	30,294	31
m3-1-4-05	0,165	9,238	10	m3-1-3-02	0,537	30,087	31
m3-1-1-13	0,171	9,558	10	m3-1-2-12	0,548	30,709	31
m3-1-1-04	0,190	10,648	11	m3-1-3-05	0,610	34,156	35
m3-1-2-01	0,180	10,062	11	m3-1-3-16	0,650	36,425	37
m3-1-4-01	0,186	10,438	11	m3-1-4-03	0,680	38,067	39
m3-1-1-03	0,211	11,797	12	m3-1-2-15	0,689	38,601	39
m3-1-2-05	0,209	11,723	12	m3-1-2-13	0,727	40,734	41
m3-1-2-06	0,220	12,323	13	m3-1-3-01	0,760	42,539	43
m3-1-2-17	0,219	12,255	13	m3-1-3-03	0,771	43,198	44
m3-1-3-15	0,225	12,610	13	m3-1-4-12	0,784	43,929	44
m3-1-4-13	0,234	13,084	14	m3-1-4-02	0,787	44,063	45
m3-1-1-07	0,267	14,951	15	m3-1-1-16	0,802	44,888	45
m3-1-4-04	0,279	15,612	16	m3-1-4-14	0,794	44,485	45
m3-1-3-17	0,276	15,460	16	m3-1-2-02	0,808	45,267	46
m3-1-3-06	0,296	16,566	17	m3-1-3-12	0,836	46,821	47
m3-1-2-04	0,337	18,862	19	m3-1-4-15	0,822	46,008	47
m3-1-1-11	0,324	18,172	19	m3-1-2-16	0,850	47,589	48
m3-1-4-06	0,371	20,789	21	m3-1-2-14	0,862	48,265	49
m3-1-1-17	0,359	20,122	21	m3-1-1-01	0,899	50,370	51
m3-1-3-13	0,378	21,183	22	m3-1-2-03	0,927	51,907	52
m3-1-2-07	0,422	23,650	24	m3-1-4-16	0,942	52,763	53
m3-1-1-15	0,421	23,553	24	m3-1-3-04	0,999	55,945	56

Asignación de turnos para los casos del *flow time mean*

Código	# rand.	# ran. X 56	Entero (turno)	Código	# rand.	# ran. X 56	Entero (turno)
m3-2-2-13	0,012	0,644	1	m3-2-2-07	0,569	31,862	32
m3-2-1-12	0,024	1,368	2	m3-2-3-07	0,568	31,829	32
m3-2-2-11	0,064	3,590	4	m3-2-1-05	0,575	32,199	33
m3-2-3-05	0,082	4,575	5	m3-2-1-14	0,583	32,650	33
m3-2-4-15	0,100	5,592	6	m3-2-2-16	0,575	32,225	33
m3-2-1-11	0,118	6,619	7	m3-2-3-06	0,590	33,034	34
m3-2-1-17	0,122	6,842	7	m3-2-4-12	0,617	34,533	35
m3-2-1-01	0,125	7,005	8	m3-2-4-07	0,627	35,084	36
m3-2-1-06	0,134	7,480	8	m3-2-2-04	0,703	39,345	40
m3-2-4-01	0,152	8,497	9	m3-2-3-03	0,709	39,712	40
m3-2-1-16	0,172	9,653	10	m3-2-3-14	0,711	39,804	40
m3-2-4-04	0,182	10,193	11	m3-2-2-17	0,729	40,842	41
m3-2-1-13	0,182	10,209	11	m3-2-3-12	0,753	42,191	43
m3-2-4-17	0,180	10,059	11	m3-2-4-14	0,753	42,178	43
m3-2-1-15	0,216	12,088	13	m3-2-3-04	0,781	43,763	44
m3-2-2-02	0,247	13,820	14	m3-2-2-12	0,768	43,032	44
m3-2-2-14	0,234	13,113	14	m3-2-3-15	0,800	44,806	45
m3-2-1-04	0,317	17,741	18	m3-2-2-01	0,819	45,879	46
m3-2-2-05	0,306	17,124	18	m3-2-4-05	0,825	46,208	47
m3-2-2-06	0,319	17,867	18	m3-2-3-11	0,856	47,918	48
m3-2-4-03	0,343	19,199	20	m3-2-1-03	0,884	49,495	50
m3-2-2-15	0,342	19,178	20	m3-2-2-03	0,880	49,263	50
m3-2-3-02	0,360	20,182	21	m3-2-4-16	0,918	51,432	52
m3-2-4-11	0,383	21,453	22	m3-2-3-01	0,951	53,280	54
m3-2-3-13	0,439	24,602	25	m3-2-4-06	0,967	54,132	55
m3-2-4-02	0,451	25,232	26	m3-2-1-02	0,988	55,354	56
m3-2-4-13	0,465	26,062	27	m3-2-1-07	0,990	55,462	56
m3-2-3-17	0,512	28,677	29	m3-2-3-16	0,988	55,335	56

Anexo F
Resultados CPLEX para el modelo
Caso m3-1-1-01

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	19	SINGLE EQUATIONS	286
BLOCKS OF VARIABLES	7	SINGLE VARIABLES	126
NON ZERO ELEMENTS	802	DISCRETE VARIABLES	102

GENERATION TIME = 0.046 SECONDS 1.6 Mb WIN207-133

EXECUTION TIME = 0.046 SECONDS 1.6 Mb WIN207-133

S O L V E S U M M A R Y

MODEL tipo3	OBJECTIVE t
TYPE MIP	DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX	FROM LINE 235

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 3407.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT	19.765	259200.000
ITERATION COUNT, LIMIT	58387	10000

User supplied options:

* CPLEX options file

aggind -1
bttol 0.85
epagap 1e-06
epgap 1e-04
epper 1e-06
heuristic -1
>> No such option.
netfind 2
simdisplay 1
startalg 2
nodesel 2
Varsel 3
tilim 259200

Proven optimal solution.

MIP Solution: 3407.000000 (58357 iterations, 9056 nodes)
Final LP: 3407.000000 (30 iterations)

Best integer solution possible: 3407.000000
 Absolute gap: 0.000000
 Relative gap: 0.000000

---- VAR x Tiempo de inicio operacion

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1.o1 .m31	.	.	+INF	1.000
t1.o3 .m41	.	500.000	+INF	.
t1.o6 .m11	.	1130.000	+INF	.
t1.o6 .m12	.	.	+INF	EPS
t1.o11.m21	.	2060.000	+INF	.
t2.o12.m21	.	2345.000	+INF	.
t3.o7 .m11	.	1985.000	+INF	.
t3.o7 .m12	.	1400.000	+INF	.
t3.o13.m21	.	2475.000	+INF	.
t4.o2 .m31	.	500.000	+INF	.
t4.o4 .m41	.	2015.000	+INF	.
t4.o8 .m11	.	2600.000	+INF	.
t4.o8 .m12	.	.	+INF	EPS
t4.o14.m21	.	3140.000	+INF	.
t5.o15.m21	.	3230.000	+INF	.
t6.o5 .m41	.	1275.000	+INF	.
t6.o9 .m11	.	2060.000	+INF	.
t6.o9 .m12	.	.	+INF	EPS
t6.o16.m21	.	2610.000	+INF	.
t7.o10.m11	.	.	+INF	EPS
t7.o10.m12	.	2015.000	+INF	.
t7.o17.m21	.	2185.000	+INF	.
t8.o18.m21	.	3335.000	+INF	.

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- VAR t -INF 3407.000 +INF .

t Makespan

---- VAR y

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1.o6 .m11	.	1.000	1.000	4100.000
t1.o6 .m12	.	.	1.000	EPS
t3.o7 .m11	.	.	1.000	EPS
t3.o7 .m12	.	1.000	1.000	EPS
t4.o8 .m11	.	1.000	1.000	4100.000
t4.o8 .m12	.	.	1.000	EPS
t6.o9 .m11	.	1.000	1.000	EPS
t6.o9 .m12	.	.	1.000	EPS
t7.o10.m11	.	.	1.000	EPS
t7.o10.m12	.	1.000	1.000	EPS

Caso m3-2-1-01

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	20	SINGLE EQUATIONS	287
BLOCKS OF VARIABLES	8	SINGLE VARIABLES	134
NON ZERO ELEMENTS	811	DISCRETE VARIABLES	102

GENERATION TIME = 0.015 SECONDS 1.6 Mb WIN207-133

EXECUTION TIME = 0.015 SECONDS 1.6 Mb WIN207-133

SOLVE SUMMARY

MODEL	tipo3	OBJECTIVE	ff
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	237

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 20542.0000

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.687	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	2590	10000

User supplied options:

* CPLEX options file

aggind -1
bttol 0.85
epagap 1e-06
epgap 1e-04
epper 1e-06
heuristic -1
>> No such option.
netfind 2
simdisplay 1
startalg 2
nodesel 2
Varsel 3
tilim 259200=2

Proven optimal solution.

MIP Solution: 20542.000000 (2562 iterations, 274 nodes)
Final LP: 20542.000000 (28 iterations)

Best integer solution possible: 20542.000000
Absolute gap: 0.000000
Relative gap: 0.000000

---- VAR x Tiempo de inicio operacion

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1.o1 .m31	.	.	+INF	8.000
t1.o3 .m41	.	500.000	+INF	.
t1.o6 .m11	.	1130.000	+INF	.
t1.o6 .m12	.	.	+INF	EPS
t1.o11.m21	.	2060.000	+INF	.
t2.o12.m21	.	2185.000	+INF	.
t3.o7 .m11	.	2186.000	+INF	.
t3.o7 .m12	.	1130.000	+INF	.
t3.o13.m21	.	1745.000	+INF	.
t4.o2 .m31	.	500.000	+INF	.
t4.o4 .m41	.	1160.000	+INF	.
t4.o8 .m11	.	2800.000	+INF	.
t4.o8 .m12	.	1745.000	+INF	.
t4.o14.m21	.	2315.000	+INF	.
t5.o15.m21	.	2405.000	+INF	.
t6.o5 .m41	.	1520.000	+INF	.
t6.o9 .m11	.	2260.000	+INF	.
t6.o9 .m12	.	2285.000	+INF	.
t6.o16.m21	.	2800.000	+INF	.
t7.o10.m11	.	.	+INF	EPS
t7.o10.m12	.	2285.000	+INF	.
t7.o17.m21	.	2510.000	+INF	.
t8.o18.m21	.	3605.000	+INF	.

---- VAR t Tiempo de finalizacion de tarea

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1	.	2185.000	+INF	.
t2	.	2315.000	+INF	.
t3	.	1880.000	+INF	.
t4	.	2405.000	+INF	.
t5	.	2510.000	+INF	.
t6	.	2900.000	+INF	.
t7	.	2670.000	+INF	.
t8	.	3677.000	+INF	.

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- VAR ff -INF 20542.000 +INF .

ff Flow Time Mean

---- VAR y

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1.o6 .m11	.	1.000	1.000	41000.000
t1.o6 .m12	.	.	1.000	EPS
t3.o7 .m11	.	.	1.000	EPS

t3.o7 .m12	.	1.000	1.000	12300.000
t4.o8 .m11	.	.	1.000	EPS
t4.o8 .m12	.	1.000	1.000	EPS
t6.o9 .m11	.	1.000	1.000	8200.000
t6.o9 .m12	.	.	1.000	EPS
t7.o10.m11	.	.	1.000	EPS
t7.o10.m12	.	1.000	1.000	4100.000

Anexo G

Utilización de Máquinas para los casos de estudio

Caso m3-1-1-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1130	930	2060
m11	o9	2060	540	2600
m11	o8	2600	540	3140
m12	o7	1400	615	2015
m12	o10	2015	1320	3335
m21	o11	2060	125	2185
m21	o17	2185	160	2345
m21	o12	2345	130	2475
m21	o13	2475	135	2610
m21	o16	2610	100	2710
m21	o14	3140	90	3230
m21	o15	3230	105	3335
m21	o18	3335	72	3407
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	500	630	1130
m41	o5	1275	740	2015
m41	o4	2015	360	2375

Caso m3-1-1-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	2680	2220	4900
m12	o7	2680	1090	3770
m12	o8	3770	465	4235
m12	o9	4235	390	4625
m12	o10	4625	690	5315
m21	o13	4293	230	4523
m21	o14	4523	102	4625
m21	o17	4625	85	4710
m21	o15	4710	84	4794
m21	o16	4794	80	4874
m21	o12	4900	291	5191
m21	o11	5191	225	5416
m21	o18	5416	75	5491
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	420	1540
m41	o3	1120	1560	2680
m41	o4	2680	285	2965
m41	o5	2965	360	3325

Caso m3-1-1-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	2830	1740	4570
m12	o7	3115	365	3480
m12	o6	3480	540	4020
m12	o9	4020	390	4410
m12	o10	4410	690	5100
m21	o11	4240	85	4325
m21	o12	4145	95	4240
m21	o13	4325	85	4410
m21	o14	4785	360	5145
m21	o15	4575	210	4785
m21	o17	4490	85	4575
m21	o16	4410	80	4490
m21	o18	5145	75	5220
m31	o1	1270	270	1540
m31	o2	0	1270	1270
m41	o3	2830	285	3115
m41	o4	1270	1560	2830
m41	o5	3115	360	3475

Caso m3-1-1-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	3615	540	4155
m11	o9	4155	1230	5385
m11	o8	5385	465	5850
m11	o7	5850	365	6215
m12	o10	3330	3255	6585
m21	o12	4155	95	4250
m21	o11	4250	85	4335
m21	o16	5837	192	6029
m21	o15	6029	84	6113
m21	o14	6113	102	6215
m21	o13	6215	85	6300
m21	o17	6300	230	6530
m21	o18	6585	159	6744
m31	o2	0	1270	1270
m31	o1	1270	270	1540
m41	o5	1270	2060	3330
m41	o3	3330	285	3615
m41	o4	3615	285	3900

Caso m3-1-1-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	2840	840	3680
m11	o8	3760	1140	4900
m12	o7	740	340	1080
m12	o6	1080	420	1500
m12	o10	2800	2040	4840
m21	o11	1500	75	1575
m21	o12	1575	81	1656
m21	o17	2800	160	2960
m21	o13	2960	80	3040
m21	o16	3680	140	3820
m21	o18	4840	120	4960
m21	o15	4960	150	5110
m21	o14	5110	240	5350
m31	o1	0	220	220
m31	o2	220	1320	1540
m41	o3	220	210	430
m41	o5	1540	1260	2800
m41	o4	2800	960	3760

Caso m3-1-1-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1680	1440	3120
m11	o9	3120	840	3960
m11	o8	3960	390	4350
m12	o7	1720	740	2460
m12	o10	2940	2040	4980
m21	o17	2940	160	3100
m21	o11	4155	160	4315
m21	o12	4315	200	4515
m21	o16	4515	140	4655
m21	o13	4655	160	4815
m21	o14	4815	90	4905
m21	o15	4905	75	4980
m21	o18	4980	120	5100
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	720	960	1680
m41	o5	1680	1260	2940
m41	o4	2940	210	3150

Caso m3-1-1-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	1680	740	2420
m11	o8	2640	1140	3780
m12	o6	1680	1440	3120
m12	o9	3120	330	3450
m12	o10	3450	555	4005
m21	o13	2420	160	2580
m21	o12	3268	200	3468
m21	o11	3468	160	3628
m21	o16	3628	72	3700
m21	o17	3700	80	3780
m21	o14	3780	240	4020
m21	o18	4020	69	4089
m21	o15	4089	150	4239
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	720	960	1680
m41	o4	1680	960	2640
m41	o5	2640	260	2900

Caso m3-1-2-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	830	930	1760
m11	o9	1760	540	2300
m11	o8	2300	540	2840
m12	o7	830	615	1445
m12	o10	1610	1320	2930
m21	o12	1700	130	1830
m21	o13	1830	135	1965
m21	o16	2395	100	2495
m21	o11	2495	125	2620
m21	o17	2620	160	2780
m21	o14	2780	90	2870
m21	o18	2870	72	2942
m21	o15	2942	105	3047
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	440	630	1070
m41	o5	1110	740	1850
m41	o4	1850	360	2210

Caso m3-1-2-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	2380	2220	4600
m12	o7	2380	1090	3470
m12	o8	3470	465	3935
m12	o9	3935	390	4325
m12	o10	4325	690	5015
m21	o13	3410	230	3640
m21	o14	4139	102	4241
m21	o15	4241	84	4325
m21	o17	4325	85	4410
m21	o16	4410	80	4490
m21	o11	4540	225	4765
m21	o12	4765	291	5056
m21	o18	5056	75	5131
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	420	1540
m41	o3	1060	1560	2620
m41	o4	2620	285	2905
m41	o5	2905	360	3265

Caso m3-1-2-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	2530	1740	4270
m12	o7	2815	365	3180
m12	o6	3180	540	3720
m12	o9	3720	390	4110
m12	o10	4110	690	4800
m21	o13	3120	85	3205
m21	o11	3660	85	3745
m21	o12	3955	95	4050
m21	o16	4050	80	4130
m21	o17	4130	85	4215
m21	o14	4215	360	4575
m21	o15	4575	210	4785
m21	o18	4785	75	4860
m31	o2	0	1270	1270
m31	o1	1270	270	1540
m41	o4	1210	1560	2770
m41	o3	2770	285	3055
m41	o5	3055	360	3415

Caso m3-1-2-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	3030	1230	4260
m11	o8	4260	465	4725
m11	o6	4725	540	5265
m11	o7	5265	365	5630
m12	o10	3030	3255	6285
m21	o12	5205	95	5300
m21	o11	5300	85	5385
m21	o14	5385	102	5487
m21	o16	5487	192	5679
m21	o13	5679	85	5764
m21	o15	5764	84	5848
m21	o17	5848	230	6078
m21	o18	6225	159	6384
m31	o2	0	1270	1270
m31	o1	1270	270	1540
m41	o5	1210	2060	3270
m41	o3	3270	285	3555
m41	o4	3555	285	3840

Caso m3-1-2-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	2540	840	3380
m11	o8	3460	1140	4600
m12	o7	440	340	780
m12	o6	780	420	1200
m12	o10	2500	2040	4540
m21	o11	1140	75	1215
m21	o12	1215	81	1296
m21	o17	2500	160	2660
m21	o16	3320	140	3460
m21	o13	3460	80	3540
m21	o18	4480	120	4600
m21	o14	4600	240	4840
m21	o15	4840	150	4990
m31	o1	0	220	220
m31	o2	220	1320	1540
m41	o3	160	210	370
m41	o5	1480	1260	2740
m41	o4	2740	960	3700

Caso m3-1-2-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1410	1440	2850
m11	o8	2850	390	3240
m11	o9	3240	840	4080
m12	o7	1380	740	2120
m12	o10	2640	2040	4680
m21	o17	2640	160	2800
m21	o11	3795	160	3955
m21	o12	3955	200	4155
m21	o15	4155	75	4230
m21	o13	4230	160	4390
m21	o14	4390	90	4480
m21	o16	4480	140	4620
m21	o18	4620	120	4740
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	660	960	1620
m41	o5	1620	1260	2880
m41	o4	2880	210	3090

Caso m3-1-2-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	1380	740	2120
m11	o8	2340	1140	3480
m12	o6	1380	1440	2820
m12	o9	2820	330	3150
m12	o10	3150	555	3705
m21	o12	3068	200	3268
m21	o13	2060	160	2220
m21	o16	3268	72	3340
m21	o11	2908	160	3068
m21	o17	3340	80	3420
m21	o14	3570	240	3810
m21	o18	3810	69	3879
m21	o15	3420	150	3570
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	660	960	1620
m41	o5	2580	260	2840
m41	o4	1620	960	2580

Caso m3-1-3-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	355	930	1285
m11	o9	1285	540	1825
m11	o8	1825	540	2365
m12	o7	290	615	905
m12	o10	1040	1320	2360
m21	o11	1165	125	1290
m21	o16	1729	100	1829
m21	o17	1829	160	1989
m21	o12	1989	130	2119
m21	o13	2119	135	2254
m21	o15	2263	105	2368
m21	o18	2368	72	2440
m21	o14	2440	90	2530
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	250	630	880
m41	o5	880	740	1620
m41	o4	1620	360	1980

Caso m3-1-3-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1130	2220	3350
m12	o7	1055	1090	2145
m12	o8	2145	465	2610
m12	o9	2610	390	3000
m12	o10	3000	690	3690
m21	o13	1920	230	2150
m21	o14	2514	102	2616
m21	o15	2616	84	2700
m21	o16	2924	80	3004
m21	o17	3004	85	3089
m21	o12	3102	291	3393
m21	o11	3393	225	3618
m21	o18	3618	75	3693
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	420	1540
m41	o3	560	1560	2120
m41	o4	2120	285	2405
m41	o5	2405	360	2765

Caso m3-1-3-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	1475	1740	3215
m12	o7	80	365	445
m12	o6	445	540	985
m12	o10	2435	690	3125
m12	o9	3125	390	3515
m21	o13	365	85	450
m21	o12	897	95	992
m21	o17	2435	85	2520
m21	o11	2520	85	2605
m21	o14	2861	360	3221
m21	o18	3221	75	3296
m21	o15	3296	210	3506
m21	o16	3506	80	3586
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	135	285	420
m41	o4	905	1560	2465
m41	o5	2465	360	2825

Caso m3-1-3-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	1495	1230	2725
m11	o7	2725	365	3090
m11	o6	3090	540	3630
m11	o8	3630	465	4095
m12	o10	1455	3255	4710
m21	o16	2537	192	2729
m21	o11	3550	85	3635
m21	o12	3635	95	3730
m21	o13	3730	85	3815
m21	o15	4014	84	4098
m21	o14	4098	102	4200
m21	o17	4200	230	4430
m21	o18	4554	159	4713
m31	o2	0	1270	1270
m31	o1	1270	270	1540
m41	o5	635	2060	2695
m41	o3	2695	285	2980
m41	o4	2980	285	3265

Caso m3-1-3-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	530	840	1370
m11	o8	1610	1140	2750
m11	o7	2750	340	3090
m12	o10	500	2040	2540
m12	o6	2540	420	2960
m21	o16	1234	140	1374
m21	o17	1374	160	1534
m21	o18	2423	120	2543
m21	o14	2543	240	2783
m21	o15	2783	150	2933
m21	o12	2933	81	3014
m21	o11	3014	75	3089
m21	o13	3089	80	3169
m31	o2	0	1320	1320
m31	o1	1320	220	1540
m41	o5	80	1260	1340
m41	o4	1340	960	2300
m41	o3	2300	210	2510

Caso m3-1-3-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	630	1440	2070
m11	o9	2070	840	2910
m11	o8	2910	390	3300
m12	o7	840	740	1580
m12	o10	1740	2040	3780
m21	o11	1915	160	2075
m21	o12	2075	200	2275
m21	o13	2275	160	2435
m21	o17	2435	160	2595
m21	o14	3216	90	3306
m21	o15	3306	75	3381
m21	o16	3381	140	3521
m21	o18	3663	120	3783
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	360	960	1320
m41	o5	1320	1260	2580
m41	o4	2580	210	2790

Caso m3-1-3-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	630	740	1370
m11	o8	1590	1140	2730
m11	o9	2730	330	3060
m12	o6	760	1440	2200
m12	o10	2200	555	2755
m21	o13	1215	160	1375
m21	o11	2093	160	2253
m21	o12	2253	200	2453
m21	o17	2453	80	2533
m21	o14	2533	240	2773
m21	o18	2773	69	2842
m21	o15	2842	150	2992
m21	o16	2992	72	3064
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	360	960	1320
m41	o4	1320	960	2280
m41	o5	2280	260	2540

Caso m3-1-4-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	110	615	725
m11	o10	725	1320	2045
m12	o6	0	930	930
m12	o9	930	540	1470
m12	o8	1470	540	2010
m21	o16	1374	100	1474
m21	o13	1474	135	1609
m21	o11	1609	125	1734
m21	o12	1734	130	1864
m21	o17	1890	160	2050
m21	o14	2050	90	2140
m21	o18	2140	72	2212
m21	o15	2212	105	2317
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	70	630	700
m41	o5	700	740	1440
m41	o4	1440	360	1800

Caso m3-1-4-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	2220	2220
m11	o8	2220	465	2685
m12	o7	565	1090	1655
m12	o10	1655	690	2345
m12	o9	2345	390	2735
m21	o13	1430	230	1660
m21	o17	1660	85	1745
m21	o12	1998	291	2289
m21	o11	2289	225	2514
m21	o18	2514	75	2589
m21	o14	2589	102	2691
m21	o15	2691	84	2775
m21	o16	2775	80	2855
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	420	1540
m41	o3	70	1560	1630
m41	o5	1630	360	1990
m41	o4	1990	285	2275

Caso m3-1-4-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	190	1740	1930
m11	o9	1930	390	2320
m12	o6	0	540	540
m12	o7	540	365	905
m12	o10	1755	690	2445
m21	o11	460	85	545
m21	o12	545	95	640
m21	o13	825	85	910
m21	o14	1576	360	1936
m21	o15	1936	210	2146
m21	o17	2146	85	2231
m21	o16	2244	80	2324
m21	o18	2373	75	2448
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	70	285	355
m41	o4	355	1560	1915
m41	o5	1915	360	2275

Caso m3-1-4-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	540	540
m11	o7	540	365	905
m11	o9	1215	1230	2445
m11	o8	2445	465	2910
m12	o10	195	3255	3450
m21	o12	452	95	547
m21	o13	825	85	910
m21	o11	910	85	995
m21	o16	2257	192	2449
m21	o14	2814	102	2916
m21	o15	2916	84	3000
m21	o17	3000	230	3230
m21	o18	3294	159	3453
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	70	285	355
m41	o5	355	2060	2415
m41	o4	2415	285	2700

Caso m3-1-4-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	0	340	340
m11	o9	750	840	1590
m11	o8	1590	1140	2730
m12	o6	0	420	420
m12	o10	420	2040	2460
m21	o13	265	80	345
m21	o17	420	160	580
m21	o12	580	81	661
m21	o16	1454	140	1594
m21	o11	1594	75	1669
m21	o18	2376	120	2496
m21	o14	2496	240	2736
m21	o15	2736	150	2886
m31	o1	0	220	220
m31	o2	220	1320	1540
m41	o3	70	210	280
m41	o5	300	1260	1560
m41	o4	1560	960	2520

Caso m3-1-4-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	1440	1440
m11	o9	1480	840	2320
m11	o8	2320	390	2710
m12	o7	315	740	1055
m12	o10	1055	2040	3095
m21	o11	1993	160	2153
m21	o12	2153	200	2353
m21	o13	2353	160	2513
m21	o17	2513	160	2673
m21	o16	2673	140	2813
m21	o14	2813	90	2903
m21	o15	2903	75	2978
m21	o18	2978	120	3098
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
			0	
m41	o3	70	960	1030
m41	o5	1030	1260	2290
m41	o4	2290	210	2500

Caso m3-1-4-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	315	740	1055
m11	o8	1055	1140	2195
m11	o9	2195	330	2525
m12	o6	0	1440	1440
m12	o10	1830	555	2385
m21	o13	900	160	1060
m21	o12	1558	200	1758
m21	o11	1758	160	1918
m21	o17	1918	80	1998
m21	o14	1998	240	2238
m21	o15	2238	150	2388
m21	o18	2388	69	2457
m21	o16	2457	72	2529
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
			0	
m41	o3	70	960	1030
m41	o4	1030	960	1990
m41	o5	1990	260	2250

Caso m3-1-1-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	9680	7140	16820
m11	o9	16820	3240	20060
m11	o8	20060	3240	23300
m12	o7	12550	3990	16540
m12	o10	16540	11040	27580
m21	o16	22910	460	23370
m21	o11	23370	710	24080
m21	o12	24080	760	24840
m21	o14	24840	360	25200
m21	o13	25200	810	26010
m21	o15	26010	510	26520
m21	o17	26520	1060	27580
m21	o18	27580	180	27760
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	3920	5760	9680
m41	o5	9680	6860	16540
m41	o4	16540	3060	19600

Caso m3-1-1-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	25180	20040	45220
m12	o7	25180	8740	33920
m12	o10	33920	4740	38660
m12	o9	38660	1740	40400
m12	o8	40400	2490	42890
m21	o13	40660	1760	42420
m21	o16	42420	260	42680
m21	o18	42680	210	42890
m21	o14	42890	480	43370
m21	o15	43370	300	43670
m21	o17	43670	310	43980
m21	o12	45220	2370	47590
m21	o11	47590	1710	49300
m31	o1	0	10120	10120
m31	o2	10120	3120	13240
m41	o3	10120	15060	25180
m41	o4	25180	2310	27490
m41	o5	27490	3060	30550

Caso m3-1-1-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	28990	3240	32230
m11	o9	32230	1740	33970
m11	o10	33970	4740	38710
m11	o7	38710	1490	40200
m12	o8	26680	15240	41920
m21	o12	32230	410	32640
m21	o11	32640	310	32950
m21	o13	40200	310	40510
m21	o17	40510	310	40820
m21	o16	40820	260	41080
m21	o18	41080	210	41290
m21	o14	41920	3060	44980
m21	o15	44980	1560	46540
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o4	11620	15060	26680
m41	o3	26680	2310	28990
m41	o5	28990	3060	32050

Caso m3-1-1-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	33990	1490	35480
m11	o8	36300	2490	38790
m11	o6	38790	3240	42030
m11	o9	42030	10140	52170
m12	o10	31680	30390	62070
m21	o14	38790	480	39270
m21	o11	42030	310	42340
m21	o12	42340	410	42750
m21	o16	52170	1380	53550
m21	o13	53550	310	53860
m21	o15	53860	300	54160
m21	o17	54160	1760	55920
m21	o18	62070	1050	63120
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o5	11620	20060	31680
m41	o3	31680	2310	33990
m41	o4	33990	2310	36300

Caso m3-1-1-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	5930	6240	12170
m11	o8	16460	9240	25700
m11	o7	25700	1240	26940
m12	o10	5900	18240	24140
m12	o6	24140	2040	26180
m21	o17	5900	1060	6960
m21	o16	11314	860	12174
m21	o18	23483	660	24143
m21	o14	24143	1860	26003
m21	o12	26003	270	26273
m21	o11	26273	210	26483
m21	o15	26483	960	27443
m21	o13	27443	260	27703
m31	o2	0	12120	12120
m31	o1	12120	1120	13240
m41	o5	80	12060	12140
m41	o4	12140	9060	21200
m41	o3	21200	1560	22760

Caso m3-1-1-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	19460	6240	25700
m11	o6	28240	12240	40480
m11	o8	40480	1740	42220
m12	o10	19180	18240	37420
m12	o7	37420	5240	42660
m21	o17	19180	1060	20240
m21	o18	37420	660	38080
m21	o16	38080	860	38940
m21	o12	40480	1460	41940
m21	o11	41940	1060	43000
m21	o13	43000	1060	44060
m21	o14	44060	360	44420
m21	o15	44420	210	44630
m31	o2	0	7120	7120
m31	o1	7120	6120	13240
m41	o5	7120	12060	19180
m41	o3	19180	9060	28240
m41	o4	28240	1560	29800

Caso m3-1-1-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	15180	5240	20420
m11	o8	24240	9240	33480
m12	o6	15180	12240	27420
m12	o9	27420	1140	28560
m12	o10	28560	3390	31950
m21	o12	29310	1460	30770
m21	o11	30770	1060	31830
m21	o13	31830	1060	32890
m21	o16	32890	180	33070
m21	o17	33070	260	33330
m21	o18	33330	150	33480
m21	o15	33480	960	34440
m21	o14	34440	1860	36300
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	6120	9060	15180
m41	o4	15180	9060	24240
m41	o5	24240	2060	26300

Caso m3-1-2-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	11040	7140	18180
m11	o9	18180	3240	21420
m11	o8	21420	3240	24660
m12	o7	9380	3990	13370
m12	o10	16240	11040	27280
m21	o11	22550	710	23260
m21	o12	23260	760	24020
m21	o13	24020	810	24830
m21	o14	24830	360	25190
m21	o15	25190	510	25700
m21	o16	25700	460	26160
m21	o17	26160	1060	27220
m21	o18	27220	180	27400
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	3860	5760	9620
m41	o5	9620	6860	16480
m41	o4	16480	3060	19540

Caso m3-1-2-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	24880	8740	33620
m11	o10	33620	4740	38360
m11	o9	38360	1740	40100
m11	o8	40100	2490	42590
m12	o6	24880	20040	44920
m21	o13	40770	1760	42530
m21	o14	42530	480	43010
m21	o15	43010	300	43310
m21	o16	43310	260	43570
m21	o17	43570	310	43880
m21	o18	43880	210	44090
m21	o11	44860	1710	46570
m21	o12	46570	2370	48940
m31	o1	0	10120	10120
m31	o2	10120	3120	13240
m41	o3	10060	15060	25120
m41	o4	25120	2310	27430
m41	o5	27430	3060	30490

Caso m3-1-2-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	26380	15240	41620
m12	o7	28690	1490	30180
m12	o6	30180	3240	33420
m12	o9	33420	1740	35160
m12	o10	35160	4740	39900
m21	o16	35100	260	35360
m21	o11	35360	310	35670
m21	o12	35670	410	36080
m21	o13	36080	310	36390
m21	o17	36390	310	36700
m21	o18	39840	210	40050
m21	o15	41560	1560	43120
m21	o14	43120	3060	46180
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o4	11560	15060	26620
m41	o3	26620	2310	28930
m41	o5	28930	3060	31990

Caso m3-1-2-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	36000	2490	38490
m11	o7	38490	1490	39980
m11	o6	39980	3240	43220
m11	o9	43220	10140	53360
m12	o10	31380	30390	61770
m21	o13	39920	310	40230
m21	o11	43160	310	43470
m21	o14	43470	480	43950
m21	o12	43950	410	44360
m21	o15	44360	300	44660
m21	o16	53300	1380	54680
m21	o17	54680	1760	56440
m21	o18	61710	1050	62760
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o5	11560	20060	31620
m41	o3	31620	2310	33930
m41	o4	33930	2310	36240

Caso m3-1-2-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	23880	6240	30120
m11	o8	32940	9240	42180
m12	o10	23880	18240	42120
m12	o6	42120	2040	44160
m12	o7	44160	1240	45400
m21	o17	23880	1060	24940
m21	o16	30060	860	30920
m21	o18	42060	660	42720
m21	o14	42720	1860	44580
m21	o12	44580	270	44850
m21	o11	44850	210	45060
m21	o15	45060	960	46020
m21	o13	46020	260	46280
m31	o2	0	12120	12120
m31	o1	12120	1120	13240
m41	o5	12060	12060	24120
m41	o4	24120	9060	33180
m41	o3	33180	1560	34740

Caso m3-1-2-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m12	o9	18880	6240	25120
m12	o6	27940	12240	40180
m12	o8	40180	1740	41920
m11	o10	18880	18240	37120
m11	o7	37120	5240	42360
m21	o16	25060	860	25920
m21	o17	38400	1060	39460
m21	o18	39460	660	40120
m21	o11	40120	1060	41180
m21	o12	41180	1460	42640
m21	o14	42640	360	43000
m21	o15	43000	210	43210
m21	o13	43210	1060	44270
m31	o2	0	7120	7120
m31	o1	7120	6120	13240
m41	o5	7060	12060	19120
m41	o3	19120	9060	28180
m41	o4	28180	1560	29740

Caso m3-1-2-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	14880	5240	20120
m11	o8	23940	9240	33180
m12	o6	14880	12240	27120
m12	o10	27120	3390	30510
m12	o9	30510	1140	31650
m21	o13	20060	1060	21120
m21	o12	30010	1460	31470
m21	o11	31470	1060	32530
m21	o16	32530	180	32710
m21	o18	32710	150	32860
m21	o17	32860	260	33120
m21	o15	33120	960	34080
m21	o14	34080	1860	35940
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	6060	9060	15120
m41	o4	15120	9060	24180
m41	o5	24180	2060	26240

Caso m3-1-3-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	4630	7140	11770
m11	o9	11770	3240	15010
m11	o8	15900	3240	19140
m12	o7	3755	3990	7745
m12	o10	10940	11040	21980
m21	o11	11065	710	11775
m21	o12	11775	760	12535
m21	o13	12535	810	13345
m21	o14	18786	360	19146
m21	o15	19146	510	19656
m21	o16	19656	460	20116
m21	o17	20116	1060	21176
m21	o18	21803	180	21983
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	1960	5760	7720
m41	o5	7720	6860	14580
m41	o4	14580	3060	17640

Caso m3-1-3-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	12380	20040	32420
m12	o7	11405	8740	20145
m12	o8	21065	2490	23555
m12	o10	23750	4740	28490
m12	o9	28490	1740	30230
m21	o17	23750	310	24060
m21	o13	24060	1760	25820
m21	o18	28984	210	29194
m21	o15	29194	300	29494
m21	o14	29494	480	29974
m21	o16	29974	260	30234
m21	o12	30234	2370	32604
m21	o11	32604	1710	34314
m31	o1	0	10120	10120
m31	o2	10120	3120	13240
m41	o3	5060	15060	20120
m41	o4	20120	2310	22430
m41	o5	22430	3060	25490

Caso m3-1-3-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	13130	15240	28370
m11	o9	28370	1740	30110
m12	o6	21815	3240	25055
m12	o7	25055	1490	26545
m12	o10	26545	4740	31285
m21	o11	24858	310	25168
m21	o12	25168	410	25578
m21	o14	25578	3060	28638
m21	o13	28638	310	28948
m21	o15	28948	1560	30508
m21	o16	30508	260	30768
m21	o17	30768	310	31078
m21	o18	31078	210	31288
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o4	5810	15060	20870
m41	o3	20870	2310	23180
m41	o5	23180	3060	26240

Caso m3-1-3-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	15760	10140	25900
m11	o8	29125	2490	31615
m11	o6	31615	3240	34855
m11	o7	34855	1490	36345
m12	o10	15630	30390	46020
m21	o11	34550	310	34860
m21	o12	34860	410	35270
m21	o14	35270	480	35750
m21	o17	35750	1760	37510
m21	o15	37510	300	37810
m21	o13	37810	310	38120
m21	o16	38120	1380	39500
m21	o18	44973	1050	46023
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o5	5810	20060	25870
m41	o3	25870	2310	28180
m41	o4	28180	2310	30490

Caso m3-1-3-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	5930	6240	12170
m11	o8	16460	9240	25700
m11	o7	25700	1240	26940
m12	o10	5900	18240	24140
m12	o6	24140	2040	26180
m21	o17	5900	1060	6960
m21	o16	11314	860	12174
m21	o18	23483	660	24143
m21	o14	24143	1860	26003
m21	o12	26003	270	26273
m21	o11	26273	210	26483
m21	o15	26483	960	27443
m21	o13	27443	260	27703
m31	o2	0	12120	12120
m31	o1	12120	1120	13240
m41	o5	80	12060	12140
m41	o4	12140	9060	21200
m41	o3	21200	1560	22760

Caso m3-1-3-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	9410	6240	15650
m11	o6	19940	12240	32180
m12	o10	9380	18240	27620
m12	o8	27620	1740	29360
m12	o7	29360	5240	34600
m21	o17	9380	1060	10440
m21	o18	28346	660	29006
m21	o14	29006	360	29366
m21	o16	29366	860	30226
m21	o12	30815	1460	32275
m21	o11	32275	1060	33335
m21	o15	33335	210	33545
m21	o13	33545	1060	34605
m31	o2	0	7120	7120
m31	o1	7120	6120	13240
m41	o5	3560	12060	15620
m41	o3	15620	9060	24680
m41	o4	24680	1560	26240

Caso m3-1-3-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	6905	5240	12145
m11	o8	16440	9240	25680
m12	o6	9681	12240	21921
m12	o9	22130	1140	23270
m12	o10	23270	3390	26660
m21	o13	11090	1060	12150
m21	o11	20866	1060	21926
m21	o12	21926	1460	23386
m21	o17	23386	260	23646
m21	o16	23646	180	23826
m21	o14	23826	1860	25686
m21	o15	25686	960	26646
m21	o18	26646	150	26796
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	3060	9060	12120
m41	o4	12120	9060	21180
m41	o5	21180	2060	23240

Caso m3-1-4-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	7140	7140
m11	o9	9480	3240	12720
m11	o8	12720	3240	15960
m12	o7	1865	3990	5855
m12	o10	5855	11040	16895
m21	o11	6435	710	7145
m21	o12	7145	760	7905
m21	o13	7905	810	8715
m21	o17	8715	1060	9775
m21	o16	12264	460	12724
m21	o14	15848	360	16208
m21	o15	16208	510	16718
m21	o18	16718	180	16898
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	70	5760	5830
m41	o5	5830	6860	12690
m41	o4	12690	3060	15750

Caso m3-1-4-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	20040	20040
m11	o9	200040	1740	201780
m12	o7	6415	8740	15155
m12	o8	15155	2490	17645
m12	o10	17645	4740	22385
m21	o13	13400	1760	15160
m21	o14	17171	480	17651
m21	o15	17651	300	17951
m21	o12	17951	2370	20321
m21	o11	20321	1710	22031
m21	o17	22031	310	22341
m21	o16	22341	260	22601
m21	o18	22601	210	22811
m31	o1	0	10120	10120
m31	o2	10120	3120	13240
m41	o3	70	15060	15130
m41	o5	15130	2310	17440
m41	o4	17440	3060	20500

Caso m3-1-4-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	0	15240	15240
m11	o9	16480	1740	18220
m11	o6	18220	3240	21460
m12	o10	14970	4740	19710
m12	o7	19710	1490	21200
m21	o14	14623	3060	17683
m21	o15	17683	1560	19243
m21	o16	19243	260	19503
m21	o18	19503	210	19713
m21	o17	19713	310	20023
m21	o13	20895	310	21205
m21	o12	21205	410	21615
m21	o11	21615	310	21925
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o4	70	15060	15130
m41	o5	15130	3060	18190
m41	o3	18190	2310	20500

Caso m3-1-4-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	10020	10140	20160
m11	o6	20160	3240	23400
m11	o7	23400	1490	24890
m11	o8	24860	2490	27350
m12	o10	0	30390	30390
m21	o17	0	1760	1760
m21	o12	25876	410	26286
m21	o11	26286	310	26596
m21	o13	26596	310	26906
m21	o14	26906	480	27386
m21	o15	27386	300	27686
m21	o16	27686	1380	29066
m21	o18	29343	1050	30393
m31	o2	0	11620	11620
m31	o1	11620	1620	13240
m41	o3	20130	2310	22440
m41	o5	70	20060	20130
m41	o4	22440	2310	24750

Caso m3-1-4-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o10	0	18240	18240
m11	o6	21035	2040	23075
m12	o9	5930	6240	12170
m12	o8	12170	9240	21410
m12	o7	21545	1240	22785
m21	o16	11314	860	12174
m21	o17	17836	1060	18896
m21	o18	18896	660	19556
m21	o14	19556	1860	21416
m21	o15	21416	960	22376
m21	o13	22530	260	22790
m21	o12	22812	270	23082
m21	o11	23082	210	23292
m31	o2	0	12120	12120
m31	o1	12120	1120	13240
m41	o5	80	12060	12140
m41	o4	12140	9060	21200
m41	o3	21200	1560	22760

Caso m3-1-4-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	5920	6240	12160
m11	o6	12160	12240	24400
m12	o10	0	18240	18240
m12	o7	18240	5240	23480
m12	o8	23480	1740	25220
m21	o17	0	1060	1060
m21	o16	11304	860	12164
m21	o18	17583	660	18243
m21	o13	22425	1060	23485
m21	o12	23485	1460	24945
m21	o14	24945	360	25305
m21	o11	25305	1060	26365
m21	o15	26365	210	26575
m31	o2	0	7120	7120
m31	o1	7120	6120	13240
m41	o5	70	12060	12130
m41	o3	12130	9060	21190
m41	o4	21190	1560	22750

Caso m3-1-4-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	3915	5240	9155
m11	o8	9155	9240	18395
m11	o9	19140	1140	20280
m12	o6	1140	12240	13380
m12	o10	18030	3390	21420
m21	o13	8100	1060	9160
m21	o12	15493	1460	16953
m21	o11	16953	1060	18013
m21	o14	18013	1860	19873
m21	o17	19873	260	20133
m21	o15	20133	960	21093
m21	o16	21093	180	21273
m21	o18	21273	150	21423
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	70	9060	9130
m41	o4	9130	9060	18190
m41	o5	18190	2060	20250

Caso m3-2-1-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1130	930	2060
m11	o9	2260	540	2800
m12	o7	1130	615	1745
m12	o8	1745	540	2285
m12	o10	2285	1320	3605
m21	o13	1745	135	1880
m21	o11	2060	125	2185
m21	o12	2185	130	2315
m21	o14	2315	90	2405
m21	o15	2405	105	2510
m21	o17	2510	160	2670
m21	o16	2800	100	2900
m21	o18	3605	72	3677
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	500	630	1130
m41	o4	1160	360	1520
m41	o5	1520	740	2260

Caso m3-2-1-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	1220	390	1610
m11	o6	3100	2220	5320
m12	o10	821	690	1511
m12	o8	1511	465	1976
m12	o7	3100	1090	4190
m21	o18	1736	75	1811
m21	o16	1811	80	1891
m21	o17	1891	85	1976
m21	o15	1976	84	2060
m21	o14	2060	102	2162
m21	o13	4190	230	4420
m21	o11	5320	225	5545
m21	o12	5545	291	5836
m31	o2	0	420	420
m31	o1	420	1120	1540
m41	o5	461	360	821
m41	o4	821	285	1106
m41	o3	1540	1560	3100

Caso m3-2-1-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	690	365	1055
m11	o9	1900	390	2290
m12	o6	1100	540	1640
m12	o10	1900	690	2590
m12	o8	3460	1740	5200
m21	o11	1670	85	1755
m21	o13	1755	85	1840
m21	o12	1840	95	1935
m21	o17	1935	85	2020
m21	o16	2290	80	2370
m21	o18	2590	75	2665
m21	o15	5200	210	5410
m21	o14	5410	360	5770
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	270	285	555
m41	o5	1540	360	1900
m41	o4	1900	1560	3460

Caso m3-2-1-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1015	540	1555
m11	o7	1555	365	1920
m11	o8	1920	465	2385
m11	o9	3885	1230	5115
m12	o10	3885	3255	7140
m21	o15	3199	84	3283
m21	o13	3283	85	3368
m21	o11	3368	85	3453
m21	o12	3453	95	3548
m21	o14	3548	102	3650
m21	o17	3885	230	4115
m21	o16	5115	192	5307
m21	o18	7140	159	7299
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	730	285	1015
m41	o4	1540	285	1825
m41	o5	1825	2060	3885

Caso m3-2-1-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	800	420	1220
m11	o9	2800	840	3640
m11	o8	3760	1140	4900
m12	o7	740	340	1080
m12	o10	2800	2040	4840
m21	o11	1250	75	1325
m21	o13	1325	80	1405
m21	o12	1405	81	1486
m21	o17	2800	160	2960
m21	o16	3640	140	3780
m21	o18	4840	120	4960
m21	o15	4960	150	5110
m21	o14	5110	240	5350
m31	o1	0	220	220
m31	o2	220	1320	1540
m41	o3	220	210	430
m41	o5	1540	1260	2800
m41	o4	2800	960	3760

Caso m3-2-1-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1710	1440	3150
m11	o9	3150	840	3990
m12	o8	1890	390	2280
m12	o7	2280	740	3020
m12	o10	3150	2040	5190
m21	o15	2280	75	2355
m21	o14	2355	90	2445
m21	o13	3020	160	3180
m21	o17	3180	160	3340
m21	o11	3340	160	3500
m21	o12	3500	200	3700
m21	o16	3990	140	4130
m21	o18	5190	120	5310
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	720	960	1680
m41	o4	1680	210	1890
m41	o5	1890	1260	3150

Caso m3-2-1-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	1080	330	1410
m11	o8	2040	1140	3180
m11	o7	3180	740	3920
m12	o10	1080	555	1635
m12	o6	3000	1440	4440
m21	o17	1080	80	1160
m21	o16	1410	72	1482
m21	o18	1635	69	1704
m21	o15	3180	150	3330
m21	o14	3330	240	3570
m21	o13	3920	160	4080
m21	o11	4440	160	4600
m21	o12	4600	200	4800
m31	o2	0	820	820
m31	o1	820	720	1540
m41	o5	820	260	1080
m41	o4	1080	960	2040
m41	o3	2040	960	3000

Caso m3-2-2-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	830	930	1760
m11	o9	1960	540	2500
m12	o7	830	615	1445
m12	o8	1445	540	1985
m12	o10	1985	1320	3305
m21	o13	1385	135	1520
m21	o11	1700	125	1825
m21	o12	1825	130	1955
m21	o14	1955	90	2045
m21	o15	2045	105	2150
m21	o17	2150	160	2310
m21	o16	2440	100	2540
m21	o18	3245	72	3317
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	440	630	1070
m41	o4	1100	360	1460
m41	o5	1460	740	2200

Caso m3-2-2-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o10	521	690	1211
m11	o8	1211	465	1676
m11	o7	2800	1090	3890
m12	o9	920	390	1310
m12	o6	2800	2220	5020
m21	o18	1376	75	1451
m21	o16	1451	80	1531
m21	o17	1531	85	1616
m21	o15	1616	84	1700
m21	o14	1700	102	1802
m21	o13	3830	230	4060
m21	o11	4960	225	5185
m21	o12	5185	291	5476
m31	o2	0	420	420
m31	o1	420	1120	1540
m41	o5	401	360	761
m41	o4	761	285	1046
m41	o3	1480	1560	3040

Caso m3-2-2-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	365	540	905
m11	o9	1600	390	1990
m12	o7	800	365	1165
m12	o10	1600	690	2290
m12	o8	3160	1740	4900
m21	o11	1310	85	1395
m21	o13	1395	85	1480
m21	o12	1480	95	1575
m21	o17	1600	85	1685
m21	o16	1930	80	2010
m21	o18	2230	75	2305
m21	o15	4840	210	5050
m21	o14	5050	360	5410
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	210	285	495
m41	o5	1480	360	1840
m41	o4	1840	1560	3400

Caso m3-2-2-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	1525	465	1990
m11	o6	1990	540	2530
m11	o7	2530	365	2895
m11	o9	3585	1230	4815
m12	o10	3585	3255	6840
m21	o15	2839	84	2923
m21	o13	2923	85	3008
m21	o11	3008	85	3093
m21	o12	3093	95	3188
m21	o14	3188	102	3290
m21	o17	3585	230	3815
m21	o16	4755	192	4947
m21	o18	6780	159	6939
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	210	285	495
m41	o4	1480	285	1765
m41	o5	1765	2060	3825

Caso m3-2-2-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	500	420	920
m11	o9	2500	840	3340
m11	o8	3460	1140	4600
m12	o7	440	340	780
m12	o10	2500	2040	4540
m21	o11	890	75	965
m21	o13	965	80	1045
m21	o12	1045	81	1126
m21	o17	2500	160	2660
m21	o16	3280	140	3420
m21	o18	4480	120	4600
m21	o15	4600	150	4750
m21	o14	4750	240	4990
m31	o1	0	220	220
m31	o2	220	1320	1540
m41	o3	160	210	370
m41	o5	1480	1260	2740
m41	o4	2740	960	3700

Caso m3-2-2-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	1410	1440	2850
m11	o9	2850	840	3690
m12	o8	1590	390	1980
m12	o7	1980	740	2720
m12	o10	2850	2040	4890
m21	o15	1920	75	1995
m21	o14	1995	90	2085
m21	o13	2660	160	2820
m21	o11	2820	160	2980
m21	o17	2980	160	3140
m21	o12	3140	200	3340
m21	o16	3630	140	3770
m21	o18	4830	120	4950
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	660	960	1620
m41	o4	1620	210	1830
m41	o5	1830	1260	3090

Caso m3-2-2-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	780	330	1110
m11	o6	2700	1440	4140
m12	o10	780	555	1335
m12	o8	1740	1140	2880
m12	o7	2880	740	3620
m21	o17	780	80	860
m21	o16	1050	72	1122
m21	o18	1275	69	1344
m21	o15	2820	150	2970
m21	o14	2970	240	3210
m21	o13	3560	160	3720
m21	o11	4080	160	4240
m21	o12	4240	200	4440
m31	o2	0	820	820
m31	o1	820	720	1540
m41	o5	760	260	1020
m41	o4	1020	960	1980
m41	o3	1980	960	2940

Caso m3-2-3-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	290	615	905
m11	o8	905	540	1445
m11	o9	1470	540	2010
m12	o6	355	930	1285
m12	o10	1400	1320	2720
m21	o13	775	135	910
m21	o12	1162	130	1292
m21	o11	1292	125	1417
m21	o14	1417	90	1507
m21	o15	1507	105	1612
m21	o17	1612	160	1772
m21	o16	1914	100	2014
m21	o18	2651	72	2723
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	250	630	880
m41	o4	880	360	1240
m41	o5	1240	740	1980

Caso m3-2-3-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	80	390	470
m11	o8	470	465	935
m11	o7	1475	1090	2565
m12	o10	50	690	740
m12	o6	1550	2220	3770
m21	o17	50	85	135
m21	o16	394	80	474
m21	o18	668	75	743
m21	o14	839	102	941
m21	o15	941	84	1025
m21	o13	2340	230	2570
m21	o12	3486	291	3777
m21	o11	3777	225	4002
m31	o2	0	420	420
m31	o1	420	1120	1540
m41	o5	80	360	440
m41	o4	440	285	725
m41	o3	980	1560	2540

Caso m3-2-3-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	80	365	445
m11	o9	1200	390	1590
m12	o6	67	540	607
m12	o10	1170	690	1860
m12	o8	2130	1740	3870
m21	o13	365	85	450
m21	o12	519	95	614
m21	o11	614	85	699
m21	o17	1170	85	1255
m21	o16	1514	80	1594
m21	o18	1788	75	1863
m21	o14	3516	360	3876
m21	o15	3876	210	4086
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	135	285	420
m41	o5	1200	360	1560
m41	o4	1560	1560	3120

Caso m3-2-3-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	67	540	607
m11	o7	607	365	972
m11	o9	1765	1230	2995
m11	o8	2995	465	3460
m12	o10	1725	3255	4980
m21	o11	883	85	968
m21	o13	968	85	1053
m21	o12	1053	95	1148
m21	o17	1725	230	1955
m21	o16	2807	192	2999
m21	o14	3364	102	3466
m21	o15	3466	84	3550
m21	o18	4824	159	4983
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	135	285	420
m41	o5	905	2060	2965
m41	o4	2965	285	3250

Caso m3-2-3-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	5	340	345
m11	o9	770	840	1610
m11	o8	1850	1140	2990
m12	o6	5	420	425
m12	o10	740	2040	2780
m21	o13	270	80	350
m21	o12	351	81	432
m21	o11	432	75	507
m21	o17	740	160	900
m21	o16	1474	140	1614
m21	o18	2663	120	2783
m21	o14	2783	240	3023
m21	o15	3023	150	3173
m31	o1	0	220	220
m31	o2	220	1320	1540
m41	o3	110	210	320
m41	o5	320	1260	1580
m41	o4	1580	960	2540

Caso m3-2-3-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	630	1440	2070
m11	o9	2070	840	2910
m12	o7	605	740	1345
m12	o8	1345	390	1735
m12	o10	1975	2040	4015
m21	o13	1190	160	1350
m21	o14	1651	90	1741
m21	o15	1741	75	1816
m21	o12	1877	200	2077
m21	o11	2077	160	2237
m21	o17	2237	160	2397
m21	o16	2774	140	2914
m21	o18	3898	120	4018
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	360	960	1320
m41	o4	1345	210	1555
m41	o5	1555	1260	2815

Caso m3-2-3-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	540	330	870
m11	o6	2070	1440	3510
m12	o10	500	555	1055
m12	o8	1110	1140	2250
m12	o7	2250	740	2990
m21	o17	500	80	580
m21	o16	802	72	874
m21	o18	989	69	1058
m21	o14	2016	240	2256
m21	o15	2256	150	2406
m21	o13	2835	160	2995
m21	o12	3317	200	3517
m21	o11	3517	160	3677
m31	o2	0	820	820
m31	o1	820	720	1540
m41	o5	580	260	840
m41	o4	840	960	1800
m41	o3	1800	960	2760

Caso m3-2-4-01

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	930	930
m11	o10	1015	1320	2335
m12	o7	110	615	725
m12	o8	725	540	1265
m12	o9	1405	540	1945
m21	o13	595	135	730
m21	o12	807	130	937
m21	o11	937	125	1062
m21	o15	1163	105	1268
m21	o14	1268	90	1358
m21	o16	1849	100	1949
m21	o17	2180	160	2340
m21	o18	2340	72	2412
m31	o1	0	500	500
m31	o2	500	660	1160
m41	o3	70	630	700
m41	o4	815	360	1175
m41	o5	1175	740	1915

Caso m3-2-4-02

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m12	o6	690	2220	2910
m11	o8	470	465	935
m11	o7	1220	1090	2310
m12	o10	0	690	690
m11	o9	80	390	470
m21	o17	0	85	85
m21	o16	394	80	474
m21	o18	618	75	693
m21	o14	839	102	941
m21	o15	941	84	1025
m21	o13	2085	230	2315
m21	o12	2626	291	2917
m21	o11	2917	225	3142
m31	o2	0	420	420
m31	o1	420	1120	1540
m41	o5	80	360	440
m41	o4	440	285	725
m41	o3	725	1560	2285

Caso m3-2-4-03

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	15	365	380
m11	o9	1200	390	1590
m11	o8	1590	1740	3330
m12	o6	0	540	540
m12	o10	1040	690	1730
m21	o13	300	85	385
m21	o12	452	95	547
m21	o11	547	85	632
m21	o17	1040	85	1125
m21	o16	1514	80	1594
m21	o18	1658	75	1733
m21	o14	2976	360	3336
m21	o15	3336	210	3546
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	70	285	355
m41	o5	1200	360	1560
m41	o4	1560	1560	3120

Caso m3-2-4-04

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	540	540
m11	o7	540	365	905
m11	o9	1215	1230	2445
m11	o8	2445	465	2910
m12	o10	195	3255	3450
m21	o17	195	230	425
m21	o12	452	95	547
m21	o11	547	85	632
m21	o13	825	85	910
m21	o16	2257	192	2449
m21	o14	2814	102	2916
m21	o15	2916	84	3000
m21	o18	3294	159	3453
m31	o1	0	270	270
m31	o2	270	1270	1540
m41	o3	70	285	355
m41	o5	355	2060	2415
m41	o4	2415	285	2700

Caso m3-2-4-05

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	420	420
m11	o7	420	340	760
m11	o9	760	840	1600
m11	o8	1600	1140	2740
m12	o10	140	2040	2180
m21	o17	140	160	300
m21	o12	346	81	427
m21	o11	427	75	502
m21	o13	685	80	765
m21	o16	1464	140	1604
m21	o18	2063	120	2183
m21	o14	2506	240	2746
m21	o15	2746	150	2896
m31	o1	0	220	220
m31	o2	220	1320	1540
m41	o3	70	210	280
m41	o5	300	1260	1560
m41	o4	1560	960	2520

Caso m3-2-4-06

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m12	o6	0	1440	1440
m11	o9	2005	840	2845
m11	o8	1180	390	1570
m11	o7	315	740	1055
m12	o10	1440	2040	3480
m21	o11	1447	160	1607
m21	o12	1247	200	1447
m21	o13	900	160	1060
m21	o17	1772	160	1932
m21	o16	2709	140	2849
m21	o14	1682	90	1772
m21	o15	1607	75	1682
m21	o18	3363	120	3483
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
			0	
m41	o3	70	960	1030
m41	o5	1555	1260	2815
m41	o4	1345	210	1555

Caso m3-2-4-07

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	1440	1440
m11	o8	1440	1140	2580
m12	o7	315	740	1055
m12	o10	1140	555	1695
m12	o9	1695	330	2025
m21	o13	900	160	1060
m21	o17	1140	80	1220
m21	o12	1247	200	1447
m21	o11	1447	160	1607
m21	o18	1629	69	1698
m21	o16	1957	72	2029
m21	o14	2346	240	2586
m21	o15	2586	150	2736
m31	o1	0	720	720
m31	o2	720	820	1540
m41	o3	70	960	1030
m41	o5	1300	260	1560
m41	o4	1560	960	2520

Caso m3-2-1-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	9680	7140	16820
m11	o9	19600	3240	22840
m12	o7	9680	3990	13670
m12	o8	13670	3240	16910
m12	o10	19600	11040	30640
m21	o13	13670	810	14480
m21	o14	16910	360	17270
m21	o15	17270	510	17780
m21	o11	17780	710	18490
m21	o12	18490	760	19250
m21	o17	19600	1060	20660
m21	o16	22840	460	23300
m21	o18	30640	180	30820
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	3920	5760	9680
m41	o4	9680	3060	12740
m41	o5	12740	6860	19600

Caso m3-2-1-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	7340	1740	9080
m11	o8	9080	2490	11570
m11	o6	28300	20040	48340
m12	o10	6680	4740	11420
m12	o7	28300	8740	37040
m21	o18	11420	210	11630
m21	o16	11630	260	11890
m21	o15	11890	300	12190
m21	o17	12190	310	12500
m21	o14	12500	480	12980
m21	o13	37040	1760	38800
m21	o11	48340	1710	50050
m21	o12	50050	2370	52420
m31	o2	0	3120	3120
m31	o1	3120	10120	13240
m41	o5	3620	3060	6680
m41	o4	6680	2310	8990
m41	o3	13240	15060	28300

Caso m3-2-1-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	6980	1490	8470
m11	o9	16300	1740	18040
m11	o8	31360	15240	46600
m12	o6	6980	3240	10220
m12	o10	16300	4740	21040
m21	o11	10220	310	10530
m21	o13	10530	310	10840
m21	o12	10840	410	11250
m21	o17	16300	310	16610
m21	o16	18040	260	18300
m21	o18	21040	210	21250
m21	o15	46600	1560	48160
m21	o14	48160	3060	51220
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	4670	2310	6980
m41	o5	13240	3060	16300
m41	o4	16300	15060	31360

Caso m3-2-1-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	4750	3240	7990
m11	o7	7990	1490	9480
m11	o8	15550	2490	18040
m11	o9	35610	10140	45750
m12	o10	35610	30390	66000
m21	o15	26050	300	26350
m21	o13	26350	310	26660
m21	o11	26660	310	26970
m21	o12	26970	410	27380
m21	o14	27380	480	27860
m21	o17	35610	1760	37370
m21	o16	45750	1380	47130
m21	o18	66000	1050	67050
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	2440	2310	4750
m41	o4	13240	2310	15550
m41	o5	15550	20060	35610

Caso m3-2-1-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	3839	2040	5879
m11	o9	25300	6240	31540
m11	o8	34360	9240	43600
m12	o7	3839	1240	5079
m12	o10	25300	18240	43540
m21	o11	6020	210	6230
m21	o13	6230	260	6490
m21	o12	6490	270	6760
m21	o17	25300	1060	26360
m21	o16	31540	860	32400
m21	o18	43540	660	44200
m21	o15	44200	960	45160
m21	o14	45160	1860	47020
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	12120	13240
m41	o3	2279	1560	3839
m41	o5	13240	12060	25300
m41	o4	25300	9060	34360

Caso m3-2-1-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	15180	12240	27420
m11	o9	28800	6240	35040
m12	o8	16740	1740	18480
m12	o7	18480	5240	23720
m12	o10	28800	18240	47040
m21	o15	18480	210	18690
m21	o14	18690	360	19050
m21	o13	23720	1060	24780
m21	o11	27420	1060	28480
m21	o12	28480	1460	29940
m21	o17	29940	1060	31000
m21	o16	35040	860	35900
m21	o18	47040	660	47700
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	6120	9060	15180
m41	o4	15180	1560	16740
m41	o5	16740	12060	28800

Caso m3-2-1-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	9180	1140	10320
m11	o6	27300	12240	39540
m12	o10	9180	3390	12570
m12	o8	18240	9240	27480
m12	o7	27480	5240	32720
m21	o17	9180	260	9440
m21	o16	10320	180	10500
m21	o18	12570	150	12720
m21	o15	27480	960	28440
m21	o14	28440	1860	30300
m21	o13	32720	1060	33780
m21	o11	39540	1060	40600
m21	o12	40600	1460	42060
m31	o2	0	7120	7120
m31	o1	7120	6120	13240
m41	o5	7120	2060	9180
m41	o4	9180	9060	18240
m41	o3	18240	9060	27300

Caso m3-2-2-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	9380	7140	16520
m11	o9	19300	3240	22540
m12	o7	9380	3990	13370
m12	o8	13370	3240	16610
m12	o10	19300	11040	30340
m21	o13	13310	810	14120
m21	o14	16550	360	16910
m21	o15	16910	510	17420
m21	o11	17420	710	18130
m21	o12	18130	760	18890
m21	o17	19300	1060	20360
m21	o16	22480	460	22940
m21	o18	30280	180	30460
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	3860	5760	9620
m41	o4	9620	3060	12680
m41	o5	12680	6860	19540

Caso m3-2-2-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o10	6380	4740	11120
m11	o7	28000	8740	36740
m12	o9	7040	1740	8780
m12	o8	8780	2490	11270
m12	o6	28000	20040	48040
m21	o18	11060	210	11270
m21	o16	11270	260	11530
m21	o15	11530	300	11830
m21	o17	11830	310	12140
m21	o14	12140	480	12620
m21	o13	36680	1760	38440
m21	o11	47980	1710	49690
m21	o12	49690	2370	52060
m31	o2	0	3120	3120
m31	o1	3120	10120	13240
m41	o5	3560	3060	6620
m41	o4	6620	2310	8930
m41	o3	13180	15060	28240

Caso m3-2-2-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	6680	1490	8170
m11	o9	16000	1740	17740
m11	o8	31060	15240	46300
m12	o6	6680	3240	9920
m12	o10	16000	4740	20740
m21	o11	9860	310	10170
m21	o13	10170	310	10480
m21	o12	10480	410	10890
m21	o17	16000	310	16310
m21	o16	17680	260	17940
m21	o18	20680	210	20890
m21	o15	46240	1560	47800
m21	o14	47800	3060	50860
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	4610	2310	6920
m41	o5	13180	3060	16240
m41	o4	16240	15060	31300

Caso m3-2-2-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	15250	2490	17740
m11	o6	17740	3240	20980
m11	o9	35310	10140	45450
m12	o7	24700	1490	26190
m12	o10	35310	30390	65700
m21	o15	25690	300	25990
m21	o11	25990	310	26300
m21	o13	26300	310	26610
m21	o12	26610	410	27020
m21	o14	27020	480	27500
m21	o17	35310	1760	37070
m21	o16	45390	1380	46770
m21	o18	65640	1050	66690
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	1560	2310	3870
m41	o4	13180	2310	15490
m41	o5	15490	20060	35550

Caso m3-2-2-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	3539	2040	5579
m11	o9	25000	6240	31240
m11	o8	34060	9240	43300
m12	o7	3539	1240	4779
m12	o10	25000	18240	43240
m21	o16	3110	860	3970
m21	o11	5660	210	5870
m21	o13	5870	260	6130
m21	o12	6130	270	6400
m21	o17	25000	1060	26060
m21	o18	43180	660	43840
m21	o15	43840	960	44800
m21	o14	44800	1860	46660
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	12120	13240
m41	o3	2219	1560	3779
m41	o5	13180	12060	25240
m41	o4	25240	9060	34300

Caso m3-2-2-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	14880	12240	27120
m11	o9	28500	6240	34740
m12	o8	16440	1740	18180
m12	o7	18180	5240	23420
m12	o10	28500	18240	46740
m21	o15	18120	210	18330
m21	o14	18330	360	18690
m21	o13	23360	1060	24420
m21	o11	27060	1060	28120
m21	o12	28120	1460	29580
m21	o17	29580	1060	30640
m21	o16	34680	860	35540
m21	o18	46680	660	47340
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	6060	9060	15120
m41	o4	15120	1560	16680
m41	o5	16680	12060	28740

Caso m3-2-2-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	8880	1140	10020
m11	o8	17940	9240	27180
m11	o7	27180	5240	32420
m12	o10	8880	3390	12270
m12	o6	27000	12240	39240
m21	o17	8880	260	9140
m21	o16	9960	180	10140
m21	o18	12210	150	12360
m21	o15	27120	960	28080
m21	o14	28080	1860	29940
m21	o13	32360	1060	33420
m21	o11	39180	1060	40240
m21	o12	40240	1460	41700
m31	o2	0	7120	7120
m31	o1	7120	6120	13240
m41	o5	7060	2060	9120
m41	o4	9120	9060	18180
m41	o3	18180	9060	27240

Caso m3-2-3-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	4630	7140	11770
m11	o9	14430	3240	17670
m12	o7	3755	3990	7745
m12	o8	9040	3240	12280
m12	o10	14000	11040	25040
m21	o13	6940	810	7750
m21	o12	11017	760	11777
m21	o15	11777	510	12287
m21	o14	12287	360	12647
m21	o11	12647	710	13357
m21	o17	14000	1060	15060
m21	o16	17214	460	17674
m21	o18	24863	180	25043
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	1960	5760	7720
m41	o4	7720	3060	10780
m41	o5	10780	6860	17640

Caso m3-2-3-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	1430	1740	3170
m11	o8	4085	2490	6575
m11	o6	15500	20040	35540
m12	o10	1400	4740	6140
m12	o7	14525	8740	23265
m21	o17	1400	310	1710
m21	o16	2914	260	3174
m21	o18	5933	210	6143
m21	o14	6143	480	6623
m21	o15	6623	300	6923
m21	o13	21510	1760	23270
m21	o12	33177	2370	35547
m21	o11	35547	1710	37257
m31	o2	0	3120	3120
m31	o1	3120	10120	13240
m41	o5	80	3060	3140
m41	o4	3140	2310	5450
m41	o3	8180	15060	23240

Caso m3-2-3-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	1655	1490	3145
m11	o9	11550	1740	13290
m11	o8	20580	15240	35820
m12	o6	1755	3240	4995
m12	o10	11520	4740	16260
m21	o13	2840	310	3150
m21	o12	4592	410	5002
m21	o11	5002	310	5312
m21	o17	11520	310	11830
m21	o16	13034	260	13294
m21	o18	16053	210	16263
m21	o14	32766	3060	35826
m21	o15	35826	1560	37386
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	810	2310	3120
m41	o5	10200	3060	13260
m41	o4	13260	15060	28320

Caso m3-2-3-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	1655	1490	3145
m11	o6	3145	3240	6385
m11	o9	17380	10140	27520
m11	o8	28435	2490	30925
m12	o10	17250	30390	47640
m21	o11	6643	310	6953
m21	o13	6953	310	7263
m21	o12	7263	410	7673
m21	o17	17250	1760	19010
m21	o16	26144	1380	27524
m21	o14	30451	480	30931
m21	o15	30931	300	31231
m21	o18	46593	1050	47643
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	810	2310	3120
m41	o5	7430	20060	27490
m41	o4	27490	2310	29800

Caso m3-2-3-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	905	1240	2145
m11	o9	7970	6240	14210
m11	o8	18500	9240	27740
m12	o6	1130	2040	3170
m12	o10	7940	18240	26180
m21	o13	1890	260	2150
m21	o12	2907	270	3177
m21	o11	3177	210	3387
m21	o17	7940	1060	9000
m21	o16	13354	860	14214
m21	o18	25523	660	26183
m21	o14	26183	1860	28043
m21	o15	28043	960	29003
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	12120	13240
m41	o3	560	1560	2120
m41	o5	2120	12060	14180
m41	o4	14180	9060	23240

Caso m3-2-3-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	7380	12240	19620
m11	o9	19620	6240	25860
m12	o7	6905	5240	12145
m12	o8	12690	1740	14430
m12	o10	19500	18240	37740
m21	o13	11090	1060	12150
m21	o14	14076	360	14436
m21	o15	14436	210	14646
m21	o12	18167	1460	19627
m21	o17	19627	1060	20687
m21	o11	20687	1060	21747
m21	o16	25004	860	25864
m21	o18	37083	660	37743
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	3060	9060	12120
m41	o4	12120	1560	13680
m41	o5	13680	12060	25740

Caso m3-2-3-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	7380	12240	19620
m12	o7	6905	5240	12145
m12	o9	13070	1140	14210
m12	o10	14210	3390	17600
m12	o8	18500	9240	27740
m21	o13	11090	1060	12150
m21	o16	14034	180	14214
m21	o17	14214	260	14474
m21	o18	17453	150	17603
m21	o12	18167	1460	19627
m21	o11	19627	1060	20687
m21	o14	25886	1860	27746
m21	o15	27746	960	28706
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	3060	9060	12120
m41	o5	12120	2060	14180
m41	o4	14180	9060	23240

Caso m3-2-4-11

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	1865	3990	5855
m11	o8	6230	3240	9470
m11	o9	13105	3240	16345
m12	o6	0	7140	7140
m12	o10	9295	11040	20335
m21	o13	5050	810	5860
m21	o12	6387	760	7147
m21	o11	7147	710	7857
m21	o15	8963	510	9473
m21	o14	9473	360	9833
m21	o17	9833	1060	10893
m21	o16	15889	460	16349
m21	o18	20158	180	20338
m31	o1	0	3920	3920
m31	o2	3920	5520	9440
m41	o3	70	5760	5830
m41	o4	6395	3060	9455
m41	o5	9455	6860	16315

Caso m3-2-4-12

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o9	1430	1740	3170
m11	o8	3170	2490	5660
m11	o7	11795	8740	20535
m12	o10	0	4740	4740
m12	o6	5285	20040	25325
m21	o17	0	310	310
m21	o16	2914	260	3174
m21	o18	4533	210	4743
m21	o14	5186	480	5666
m21	o15	5666	300	5966
m21	o13	18780	1760	20540
m21	o12	22962	2370	25332
m21	o11	25332	1710	27042
m31	o2	0	3120	3120
m31	o1	3120	10120	13240
m41	o5	80	2310	2390
m41	o4	3140	3060	6200
m41	o3	5450	15060	20510

Caso m3-2-4-13

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	3240	3240
m11	o9	11550	1740	13290
m11	o8	13290	15240	28530
m12	o7	915	1490	2405
m12	o10	10040	4740	14780
m21	o13	2100	310	2410
m21	o12	2837	410	3247
m21	o11	3247	310	3557
m21	o17	10040	310	10350
m21	o16	13034	260	13294
m21	o18	14573	210	14783
m21	o14	25476	3060	28536
m21	o15	28536	1560	30096
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	70	2310	2380
m41	o5	10200	3060	13260
m41	o4	13260	15060	28320

Caso m3-2-4-14

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	3240	3240
m11	o9	12330	10140	22470
m11	o8	22470	2490	24960
m12	o7	915	1490	2405
m12	o10	2405	30390	32795
m21	o13	2100	310	2410
m21	o12	2837	410	3247
m21	o11	3247	310	3557
m21	o17	3557	1760	5317
m21	o16	21094	1380	22474
m21	o14	24486	480	24966
m21	o15	24966	300	25266
m21	o18	31748	1050	32798
m31	o1	0	1620	1620
m31	o2	1620	11620	13240
m41	o3	70	2310	2380
m41	o5	2380	20060	22440
m41	o4	22440	2310	24750

Caso m3-2-4-15

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o6	0	2040	2040
m11	o9	7480	6240	13720
m11	o8	13720	9240	22960
m12	o7	415	1240	1655
m12	o10	1655	18240	19895
m21	o13	1400	260	1660
m21	o12	1777	270	2047
m21	o11	2047	210	2257
m21	o17	2257	1060	3317
m21	o16	12864	860	13724
m21	o18	19238	660	19898
m21	o14	21106	1860	22966
m21	o15	22966	960	23926
m31	o1	0	1120	1120
m31	o2	1120	12120	13240
m41	o3	70	1560	1630
m41	o5	1630	12060	13690
m41	o4	13690	9060	22750

Caso m3-2-4-16

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o7	3915	5240	9155
m11	o8	11530	1740	13270
m11	o9	19105	6240	25345
m12	o6	0	12240	12240
m12	o10	13095	18240	31335
m21	o13	8100	1060	9160
m21	o12	10787	1460	12247
m21	o11	12247	1060	13307
m21	o15	13307	210	13517
m21	o14	13517	360	13877
m21	o17	13877	1060	14937
m21	o16	24489	860	25349
m21	o18	30678	660	31338
m31	o1	0	6120	6120
m31	o2	6120	7120	13240
m41	o3	70	9060	9130
m41	o4	11695	1560	13255
m41	o5	13255	12060	25315

Caso m3-2-4-17

Máquina	Operación	Inicio	Proceso	Fin
m11	o8	0	9240	9240
m11	o9	10080	1140	11220
m11	o6	11220	12240	23460
m12	o10	8970	3390	12360
m12	o7	15035	5240	20275
m21	o14	7386	1860	9246
m21	o17	9246	260	9506
m21	o15	9506	960	10466
m21	o16	11044	180	11224
m21	o18	12213	150	12363
m21	o13	19220	1060	20280
m21	o12	22007	1460	23467
m21	o11	23467	1060	24527
m31	o2	0	7120	7120
m31	o1	7120	6120	13240
m41	o4	70	9060	9130
m41	o5	9130	2060	11190
m41	o3	11190	9060	20250

