

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Organización Industrial y
Gestión de Empresas

El diseño en planta de células de fabricación reconfigurables. Modelado y resolución de problemas.

Autor: Sara María Fernández Gómez

Tutores: Ignacio Eguía Salinas y José Carlos Molina Gómez

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Máster
Ingeniería en Organización Industrial y Gestión de Empresas

El diseño en planta de células de fabricación reconfigurables. Modelado y resolución de problemas.

Autor:

Sara María Fernández Gómez

Tutores:

Ignacio Eguía Salinas

José Carlos Molina Gómez

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Máster: El diseño en planta de células de fabricación reconfigurables. Modelo y resolución de problemas.

Autor: Sara María Fernández Gómez

Tutores: Ignacio Eguía Salinas y
José Carlos Molina Gómez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores Ignacio y José Carlos, por su gran ayuda y dedicación en este Trabajo de Fin de Máster. Se han adaptado a mis circunstancias profesionales y a una situación que nadie imaginaba por la circunstancia que estamos viviendo. Como profesores, también me gustaría agradecer a Pedro Luis y David Canca, que me han dado los cimientos para llevar a cabo este máster con las asignaturas de complemento.

Me gustaría agradecer a todas las personas que han estado en esta aventura, combinar trabajo y estudio ha sido duro, pero ha merecido la pena. Quiero agradecer el apoyo incondicional de mis padres y de mi hermana, que aun viéndome agobiada siempre me han hecho sentir que podía llevarlo a cabo. A Ángel, mi compañero de viaje, gracias por hacer amenas nuestras citas en tantos fines de semanas en la biblioteca y, sobre todo, por aguantar mis agobios. También, me gustaría agradecer a todos mis amigos que han creído y confiado en mí.

Por último, me gustaría agradecer a los mejores amigos que me ha podido dar este máster, María y Sebastián. Nos podemos definir como unos compañeros incuestionables, hemos compartido todo lo que sabíamos desde el principio y hemos compartido muchos momentos que nunca se me olvidarán.

*Sara María Fernández Gómez
Sevilla, 2020*

Resumen

Este proyecto presenta un estudio sobre el diseño de células de fabricación reconfigurables como alternativa para la resolución del problema de la distribución en planta. La fabricación reconfigurable es un nuevo paradigma de fabricación que se planteó formalmente a mediados de los '90 como respuesta a los incipientes problemas relacionados con la rápida introducción de nuevos productos (amplia variedad), y el creciente incremento de la personalización (baja rotación). En este contexto, estos sistemas, plantean la generación de herramientas y metodología para diseñar sistemas y evaluar las diversas configuraciones en base a criterios económicos, de calidad y de fiabilidad. Estos sistemas incorporan conceptos como los de máquinas reconfigurables, módulos para máquinas reconfigurables, rutas alternativas, reconfiguración del mobiliario entre periodos, etc. Toda esta ideología se verá analizada a lo largo de este trabajo y aplicada a los nuevos modelos matemáticos, basados en células de fabricación, que se generarán para proporcionar soluciones a sistemas reconfigurables.

Abstract

This project presents a study on the design of reconfigurable manufacturing cells as an alternative for solving the problem of plant distribution. Reconfigurable manufacturing is a new manufacturing paradigm that was formally raised in the mid-1990s in response to emerging problems related to the rapid introduction of new products (wide variety), and the increasing increase in customization (low turnover). In this context, these systems propose the generation of tools and methodology to design systems and evaluate the various configurations based on economic, quality and reliability criteria. These systems incorporate concepts such as reconfigurable machines, modules for reconfigurable machines, alternative routes, reconfiguration of furniture between periods, etc. All this ideology will be analyzed throughout this work and applied to the new mathematical models, based on manufacturing cells, that will be generated to provide solutions to reconfigurable systems.

Índice

Agradecimientos	6
Resumen	7
Abstract	8
Índice	9
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras	15
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. Objetivo y alcance	18
1.2. Estructura del trabajo.....	18
2. EL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA	20
2.1. ¿Qué es la distribución en planta?.....	20
2.2. Factores que influyen en la distribución en planta.....	21
2.3. Ventajas de la distribución en planta	21
2.4. Principios de la distribución en planta	22
2.5. Tipos de distribución en planta	22
2.6. El problema de distribución en planta en tres capas	23
2.7. Modelos matemáticos del problema de distribución en planta	24
2.7.1. El problema estático de distribución en planta	24
2.7.2. El problema dinámico de distribución en planta	26
2.7.3. El problema de distribución en planta continuo con tamaño rectangular de instalaciones	28
2.7.4. El problema de distribución en planta con células de fabricación	29
2.8. Métodos de resolución del problema de distribución en planta.....	31
2.8.1. Algoritmos heurísticos	31
2.8.2. Algoritmos metaheurísticos	33
2.8.2.1. Algoritmos genéticos	33
2.8.2.2. Búsqueda Tabú.....	34
2.8.2.3. Recocido simulado	34
3. LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN RECONFIGURABLES.....	36
3.1. Introducción a los sistemas de fabricación reconfigurables (RMS).....	36
3.1.1. ¿Qué es RMS?	37
3.1.2. Principales características de un RMS	37
3.1.3. El proceso de diseño de sistemas de fabricación reconfigurables	38
3.1.4. Beneficios de los sistemas de producción reconfigurables	39

3.2.	Máquinas Reconfigurables	40
3.2.1.	¿Qué son las máquinas reconfigurables?	40
3.2.2.	Características de las máquinas reconfigurables	40
3.2.3.	Requerimientos de las máquinas reconfigurables	41
3.2.4.	Planteamiento de estudio de las máquinas reconfigurables en sistemas reconfigurables	41
3.3.	Células de fabricación en sistemas reconfigurables	42
3.4.	Ejemplo de aplicación de la distribución en planta de sistemas reconfigurables mediante modelos matemáticos	44
3.4.1.	Distribución en planta de departamentos con reconfiguración	46
3.4.2.	Distribución en departamentos de máquinas reconfigurables	46
4.	MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA EN CÉLULAS DE FABRICACIÓN RECONFIGURABLES	49
4.1.	Modelo 1	49
4.2.	Modelo 2	52
4.3.	Modelo 3	56
4.4.	Modelo 4	60
5.	EXPERIMENTACIÓN	66
5.1.	Introducción	66
5.2.	Casos de prueba	66
5.2.1.	Caso 1	66
5.2.1.1.	Caso 1 en Modelo 4	66
5.2.1.2.	Caso 1 en Modelo 3	71
5.2.1.3.	Caso 1 en Modelo 2	72
5.2.1.4.	Caso 1 en Modelo 1	72
5.2.2.	Caso 2	73
5.2.2.1.	Caso 2 en Modelo 4	73
5.2.2.2.	Caso 2 en Modelo 3	77
5.2.2.3.	Caso 2 en Modelo 2	78
5.2.2.4.	Caso 2 en Modelo 1	78
5.3.	Resultados casos de prueba	79
5.3.1.	Resultados Caso 1	79
5.3.1.1.	Modelo 1	79
5.3.1.2.	Modelo 2	80
5.3.1.3.	Modelo 3	83
5.3.1.4.	Modelo 4	84
5.3.2.	Resultados Caso 2	90
5.3.2.1.	Modelo 1	90
5.3.2.2.	Modelo 2	92

5.3.2.3.	Modelo 3.....	93
5.3.2.4.	Modelo 4.....	94
5.4.	Análisis de sensibilidad.....	101
5.4.1.	Análisis de costes	101
5.4.1.1.	Análisis sobre costes de movimientos intra e inter- celulares.....	101
5.4.1.2.	Análisis sobre costes de procesados	102
5.4.1.3.	Análisis sobre costes de reconfiguración	103
5.4.1.4.	Análisis sobre costes de inventarios	105
5.4.2.	Análisis de Capacidades	107
5.4.2.1.	Análisis de capacidades de las máquinas.....	107
5.4.2.2.	Análisis de capacidades de los módulos.....	109
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	111
7.	BIBLIOGRAFÍA	112
I.	ANEXO 1. CÓDIGOS FUENTES.....	115
II.	ANEXO 2. HOJAS DE RESULTADOS	231

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Matriz secuencia de operaciones vs pieza Modelo 1</i>	51
<i>Tabla 2 Matriz asik Modelo 1</i>	51
<i>Tabla 3 Matriz secuencia de operaciones vs pieza Modelo 2</i>	54
<i>Tabla 4 Matriz asik Modelo 2</i>	54
<i>Tabla 5 Matriz secuencia de operaciones vs pieza Modelos 3 y 4</i>	58
<i>Tabla 6 Matriz asik Modelo 3 y 4</i>	58
<i>Tabla 7 Secuencia de operaciones Modelos 3 y 4 en Caso I</i>	67
<i>Tabla 8 Matriz de distancias Caso I</i>	68
<i>Tabla 9 Demandas Caso I (3 periodos)</i>	68
<i>Tabla 10 Costes intracelulares / intercelular Caso I</i>	68
<i>Tabla 11 Costes unitarios de procesado de cada máquina Caso I</i>	69
<i>Tabla 12 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso I</i>	69
<i>Tabla 13 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso I</i>	69
<i>Tabla 14 Costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas Caso I</i>	69
<i>Tabla 15 Número máximo de módulos auxiliares (z) que pueden ir en cada máquina Caso I</i>	69
<i>Tabla 16 Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar Caso I</i>	69
<i>Tabla 17 Capacidad de la máquina Caso I</i>	70
<i>Tabla 18 Número de módulos auxiliares Caso I</i>	70
<i>Tabla 19 Demandas Caso I (dos periodos)</i>	70
<i>Tabla 20 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso I (dos periodos)</i>	70
<i>Tabla 21 Capacidad de las máquinas Caso I (dos periodos)</i>	70
<i>Tabla 22 Número de módulos auxiliares disponibles (tres periodos)</i>	71
<i>Tabla 23 Demandas Caso I (un periodo)</i>	71
<i>Tabla 24 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso I (un periodo)</i>	71
<i>Tabla 25 Capacidad de las máquinas del primer periodo Caso I (un periodo)</i>	71
<i>Tabla 26 Número de módulos auxiliares disponibles Caso I (un periodo)</i>	71
<i>Tabla 27 Secuencia de operaciones modelo 2 Caso I</i>	72
<i>Tabla 28 Secuencia de operaciones modelo 1 Caso I</i>	73
<i>Tabla 29 Secuencia de operaciones modelos 2 y 4 Caso II</i>	73
<i>Tabla 30 Matriz de distancias Caso II</i>	74
<i>Tabla 31 Demanda Caso II (tres periodos)</i>	74
<i>Tabla 32 Costes intracelulares / intercelular Caso II</i>	75

<i>Tabla 33 Costes unitarios de procesado de cada máquina Caso II</i>	75
<i>Tabla 34 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso II</i>	75
<i>Tabla 35 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso II</i>	75
<i>Tabla 36 Costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas Caso II</i>	75
<i>Tabla 37 Número máximo de módulos auxiliares (z) que pueden ir en cada máquina Caso II</i>	75
<i>Tabla 38 Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar Caso II</i>	75
<i>Tabla 39 Capacidad de la máquina Caso II</i>	76
<i>Tabla 40 Número de módulos auxiliares (z)</i>	76
<i>Tabla 41 Demanda Caso II (dos periodos)</i>	76
<i>Tabla 42 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso II</i>	76
<i>Tabla 43 Capacidad de las máquinas Caso II</i>	76
<i>Tabla 44 Número de módulos auxiliares disponibles</i>	77
<i>Tabla 45 Demandas Caso II (un periodo)</i>	77
<i>Tabla 46 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso II</i>	77
<i>Tabla 47 Capacidad de las máquinas Caso II (un periodo)</i>	77
<i>Tabla 48 Número de módulos auxiliares disponibles Caso II (un periodo)</i>	77
<i>Tabla 49 Secuencia de operaciones modelo 2 Caso II</i>	78
<i>Tabla 50 Secuencia de operaciones modelo 1 Caso II</i>	79
<i>Tabla 51 Modelos a ejecutar</i>	79
<i>Tabla 52 Función objetivo (costes) modelo 1 Caso I</i>	80
<i>Tabla 53 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I</i>	81
<i>Tabla 54 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I</i>	81
<i>Tabla 55 Piezas fabricadas modelo 1 Caso I</i>	82
<i>Tabla 56 Secuencia de operaciones modelo 2 Caso I</i>	82
<i>Tabla 57 Ruta vs Pieza Caso I</i>	82
<i>Tabla 58 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I</i>	83
<i>Tabla 59 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I</i>	83
<i>Tabla 60 Piezas fabricadas en los modelos Caso I</i>	84
<i>Tabla 61 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso I</i>	87
<i>Tabla 62 Cantidad de piezas fabricadas modelo 4 Caso I</i>	87
<i>Tabla 63 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso I</i>	87
<i>Tabla 64 Cantidades a fabricar modelo 4 (lineal/ no lineal)</i>	88
<i>Tabla 65 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso I</i>	88
<i>Tabla 66 Cantidades de piezas a fabricar (no lineal) Caso I</i>	88
<i>Tabla 67 Cantidades de piezas a fabricar (lineal) Caso I</i>	89
<i>Tabla 68 Secuencia de operaciones Caso II</i>	91

<i>Tabla 69 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso I I</i>	92
<i>Tabla 70 Piezas fabricadas Modelo 2 Caso II</i>	93
<i>Tabla 71 Función objetivo (costes) modelo 3 Caso II</i>	93
<i>Tabla 72 Piezas fabricadas Modelo 3 Caso II</i>	94
<i>Tabla 73 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso II (un periodo)</i>	96
<i>Tabla 74 Piezas fabricadas Modelo 4 Caso II (un periodo)</i>	97
<i>Tabla 75 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso II (dos periodos)</i>	97
<i>Tabla 76 Cantidades fabricadas Modelo 4 (no lineal) Caso II (dos periodos)</i>	97
<i>Tabla 77 Cantidades fabricadas Modelo 4 (lineal) Caso II (dos periodos)</i>	98
<i>Tabla 78 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso II (tres periodos)</i>	98
<i>Tabla 79 Cantidades fabricadas Modelo 4 (no lineal) Caso II (tres periodos)</i>	99
<i>Tabla 80 Cantidades fabricadas Modelo 4 (no lineal) Caso II (tres periodos)</i>	99
<i>Tabla 81 Datos de experimentación en costes intracelulares / intercelulares</i>	101
<i>Tabla 82 Resultados de experimentación en costes de movimientos intracelulares / intercelulares</i>	102
<i>Tabla 83 Datos de experimentación sobre costes de procesados</i>	102
<i>Tabla 84 Resultados experimentación en costes de procesados</i>	103
<i>Tabla 85 Datos de experimentación sobre costes de reconfiguración</i>	103
<i>Tabla 86 Resultados experimentación en costes de reconfiguración</i>	105
<i>Tabla 87 Datos de experimentación sobre costes de inventarios</i>	105
<i>Tabla 88 Resultados experimentación en costes de inventario</i>	106
<i>Tabla 89 Datos de experimentación sobre capacidades de la máquina</i>	107
<i>Tabla 90 Datos de experimentación sobre capacidades de la máquina</i>	107
<i>Tabla 91 Resultados experimentación en capacidades de las máquinas</i>	108
<i>Tabla 92 Datos de experimentación sobre capacidades de los módulos</i>	109
<i>Tabla 93 Datos de experimentación sobre capacidades de los módulos</i>	109
<i>Tabla 94 Resultados experimentación en capacidades de los módulos</i>	109

Índice de figuras

Figura 1	Esquema del modelo de 3 capas -Meng, Heragu y Zijm (2004).....	23
Figura 2	Gráfico del problema estático de distribución en planta.....	25
Figura 3	Gráfico del problema dinámico de distribución en planta.....	27
Figura 4	Gráfico del problema en planta continuo con tamaño rectangular de instalaciones.....	29
Figura 5	Esquema del enfoque intralintercelular de Forghani et al. (2015).....	31
Figura 6	Esquema del enfoque intralintercelular de Mohammadi y Forghani (2014).....	31
Figura 7	Gráfico de secuencia de operaciones, rutado y coste de materiales – Khatamian (2009).....	43
Figura 8	Gráfico proceso de diseño axiomático – Bortolini (2019).....	44
Figura 9	Decisión sobre los modelos de programación mixta-entera – Azevedo, Crispim y Souza (2013).....	45
Figura 10	Modelos matemáticos para la distribución en planta en células de fabricación reconfigurables.....	49
Figura 11	Gráfico células de fabricación.....	50
Figura 12	Gráfico de distancias Caso I.....	68
Figura 13	Gráfico de distancias Caso II.....	74
Figura 14	Distribución en planta modelo 1 (no lineal) Caso I.....	80
Figura 15	Distribución en planta modelo 1 (lineal) Caso I.....	80
Figura 16	Distribución en planta modelo 2 (no lineal) Caso I.....	81
Figura 17	Distribución en planta modelo 2 (lineal) Caso I.....	81
Figura 18	Diagrama comparación modelo 2 (lineal y no lineal) Caso I.....	82
Figura 19	Distribución en planta modelo 3 (no lineal) Caso I.....	83
Figura 20	Distribución en planta modelo 3 (lineal) Caso I.....	83
Figura 21	Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso I (un periodo).....	84
Figura 22	Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso I (dos periodos).....	85
Figura 23	Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso I (tres periodos).....	85
Figura 24	Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso I (un periodo).....	86
Figura 25	Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso I (dos periodos).....	86
Figura 26	Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso I (tres periodos).....	86
Figura 27	Diagrama costes modelo 4 (lineal y no lineal) Caso I.....	88
Figura 28	Diagrama comparación modelo 4 (lineal y no lineal) Caso I.....	89
Figura 29	Gráfico comparativo de tiempos de computación entre modelos (Caso I).....	89
Figura 30	Gráfico costes totales de todos los modelos implicados (Caso I).....	90
Figura 31	Distribución en planta modelo 1 (no lineal) Caso II.....	91
Figura 32	Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II.....	91

<i>Figura 33 Distribución en planta modelo 2 (no lineal) Caso II</i>	92
<i>Figura 34 Distribución en planta modelo 2 (lineal) Caso II</i>	92
<i>Figura 35 Distribución en planta modelo 3 (no lineal) Caso II</i>	93
<i>Figura 36 Distribución en planta modelo 2 (lineal) Caso II</i>	93
<i>Figura 37 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso II (un periodo)</i>	94
<i>Figura 38 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso II (dos periodos)</i>	95
<i>Figura 39 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso II (tres periodos)</i>	95
<i>Figura 40 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II (un periodo)</i>	95
<i>Figura 41 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II (dos periodos)</i>	96
<i>Figura 42 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II (3 periodos)</i>	96
<i>Figura 43 Gráfico de costes Modelo 4 (lineal / no lineal) Caso II (dos periodos)</i>	98
<i>Figura 44 Gráfico de costes Modelo 4 (lineal / no lineal) Caso II (tres periodos)</i>	99
<i>Figura 45 Gráfico comparativo de tiempos de computación entre modelos (Caso II)</i>	100
<i>Figura 46 Gráfico costes totales de todos los modelos implicados (Caso II)</i>	100

1. INTRODUCCIÓN

*Nunca sueño con el éxito. Trabajo para conseguirlo.
- Estee Lauder -*

La planificación y la distribución en planta determina la eficiencia y, posiblemente, la supervivencia de una empresa. La distribución de instalaciones en planta, implica el ordenamiento físico de los elementos productivos, que incluye los espacios necesarios para el mejoramiento de material y personal, ubicación de activos, almacenamiento y todas las otras actividades o servicios que permitan un óptimo desenvolvimiento de las operaciones.

En este trabajo, el diseño y distribución de instalaciones en planta, se determinará bajo el enfoque de la fabricación celular y los sistemas de fabricación reconfigurables. La fabricación celular se caracteriza por una distribución de máquinas en células de fabricación. Cada célula está compuesta por una o varias máquinas diferentes que realizan determinadas tareas asociadas a la fabricación de una familia de productos con características similares. Por ello, cada producto se desplazará dentro de la misma célula y sólo en algunos casos se desplazarán de una célula a otra para completar parte del proceso de fabricación. El objetivo de usar este tipo de sistemas de fabricación es trabajar lo más rápido posible, hacer una amplia variedad de productos similares y hacer el menor desperdicio. Por otro lado, ayuda a focalizar mejor los problemas que ocurren dentro de una célula y fomenta la comunicación entre los empleados. Cuando se implantan estos tipos de sistemas, se generan ganancias masivas de productividad y calidad, al tiempo que se reduce la cantidad de inventario, espacio y tiempo.

Los sistemas de fabricación que se implantan en las empresas de producción deben tener tres objetivos principales: producir a bajo costo, mejorar la calidad del producto y poseer capacidades para una rápida respuesta. Como se ha comentado, en este trabajo el diseño de la distribución en planta, se realizará considerando la fabricación celular y los sistemas de fabricación reconfigurables, los cuales se enfocan en lograr el tercer objetivo: la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda, manteniendo su logro a bajo costo y de forma rápida. Estos sistemas ofrecen beneficios mucho mayores a los fabricantes que los sistemas de fabricación tradicionales.

A finales del siglo, XX, la industria de la fabricación entró en una nueva era en la que todas las empresas deben competir en una economía global. La competencia global aumenta el poder adquisitivo de los clientes, lo que a su vez, impulsa la introducción frecuente de nuevos productos y provoca grandes fluctuaciones en la demanda de productos (Ayadehe *et al.*, 2010).

Para seguir siendo competitivas, las empresas de fabricación deben utilizar sistemas que no solo fabriquen los productos con alta productividad, sino que también permitan una respuesta rápida a los cambios del mercado y las necesidades de los consumidores. Por ello, el concepto de sistemas reconfigurables, representa el de una fábrica viva y en evolución que se adapta rápidamente a los nuevos productos y las cambiantes demandas del mercado.

El diseño de distribución en planta, las células de fabricación y los sistemas de fabricación reconfigurables, que se estudiarán en el este trabajo, llevarán al desarrollo de nuevos modelos matemáticos para la definición del problema y su posterior resolución.

La función objetivo de estos modelos tratará de reducir los costes que el sistema conlleva, creando variables de decisión para su resolución y definiendo restricciones del problema, que limitan los valores que pueden tomar las variables que se hayan creado.

1.1. Objetivo y alcance

El objetivo principal de este trabajo es la definición de modelos matemáticos que describan problemas de distribución en planta donde existan células de fabricación y máquinas reconfigurables. Dichos modelos se validarán mediante la resolución óptima de casos de tamaño pequeño.

Para llevar a cabo este objetivo, se ha realizado el estudio de múltiples artículos científicos que analizan el problema de la distribución en planta, partiendo de problemas básicos hasta los más complejos. Dichos artículos, han servido de base para plantear los modelos matemáticos de cuatro problemas que incorporan los siguientes objetivos:

- ✓ Resolución del problema de asignación de máquinas a ubicaciones dentro de células de fabricación (distribución en planta con células).
- ✓ Resolución del problema de distribución en planta con células y planificación de la producción con rutas alternativas, considerando capacidades de las máquinas.
- ✓ Resolución del problema de distribución en planta con células y planificación de la producción con rutas alternativas y máquinas reconfigurables.
- ✓ Resolución del problema de distribución en planta con células y planificación de la producción con rutas alternativas, máquinas reconfigurables y posibilidad de reconfiguración del sistema de periodo a periodo.

Como se observa, la construcción de los modelos se hará de forma gradual pues cada modelo extiende las características del modelo anterior. Estos modelos darán como resultado la minimización de diversos costes que conlleva incorporar todas las características en un modelo de programación matemática.

Los costes que se incorporan en la función objetivo del modelo completo son los siguientes:

- ✓ Coste intracelular (movimientos dentro de la célula de fabricación).
- ✓ Coste intercelular (movimientos entre células de fabricación).
- ✓ Coste asociado al tiempo de procesado de las máquinas.
- ✓ Coste de asignación de módulos para máquinas reconfigurables.
- ✓ Coste de reconfiguración de máquinas de un periodo a otro.
- ✓ Coste de mantenimiento de productos en inventario de un periodo a otro.

Una vez planteados los modelos matemáticos asociados a los problemas que se han mencionado, se establecerán una serie de casos para obtener un valor cuantitativo y así, poder validar los modelos y valorar el impacto que tiene los parámetros del problema (costes, limitaciones...). La resolución de estos casos para cada modelo se realizará mediante el software LINGO. Posteriormente, se realizará un análisis de sensibilidad sobre nuevos experimentos, variando los diferentes parámetros para ver su impacto sobre los costes.

1.2. Estructura del trabajo

Las secciones 2 y 3 se corresponden al Estado del Arte, que comprende una revisión bibliográfica de los estudios

y publicaciones más relevantes que tratan el tema del problema de diseño y distribución en planta, las células de fabricación, los sistemas de fabricación reconfigurables y las formulaciones matemáticas que se han realizado para la distribución en planta. En la sección 4 se definen los modelos asociados a los problemas que se plantean en este trabajo fin de máster, y que son el núcleo del mismo. En la sección 5, se lleva a cabo la experimentación de los modelos, el análisis de sensibilidad y los resultados obtenidos. Por último, las conclusiones se muestran en la sección 6, y finalmente, la bibliografía.

2. EL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

La productividad nunca es un accidente. Siempre es el resultado de un compromiso con la excelencia, planificación inteligente y esfuerzo concentrado

- Paul J. Meyer-

El problema del diseño y distribución de instalaciones en planta (*facility layout*, en inglés, y comúnmente *distribución en planta*, en español) tiene como objetivo principal lograr una mayor eficiencia y flexibilidad en la satisfacción de la demanda, mediante una correcta ordenación de los recursos y los medios de producción, que permitan hacer frente a situaciones de mercado actuales y futuras.

En este apartado, se definirá el problema de distribución en planta y su entorno, tipos de enfoques y su resolución mediante diferentes métodos matemáticos.

2.1. ¿Qué es la distribución en planta?

El diseño y distribución de instalaciones en planta es un elemento que forma parte de las estrategias tales como Lean, o Just in time, en las cuales se resalta la importancia de una buena disposición de los recursos disponibles en la planta y el impacto que genera (Leimkuhler, 1968).

La planta es la representación física de los procesos productivos, es el espacio que facilita la actividad llevada a cabo por una organización (Leimkuhler, 1968).

El diseño de una planta es la estrategia, o configuración que se le da a una planta en la cual se definen los espacios donde se ubicarán las diferentes instalaciones (Gómez, 2012).

La distribución en planta de instalaciones es una disposición de todo lo necesario para la producción de bienes o la prestación de servicios. Una instalación es una entidad que facilita el desempeño de cualquier trabajo. Puede ser una máquina, una herramienta, un centro de trabajo, una célula de fabricación, un taller mecánico, un departamento, un almacén, etc (Amine and Henri, 2007).

Para operar sistemas de producción o de servicios de forma eficiente, los sistemas deben operar con políticas óptimas de planificación y operación y con un buen diseño de las instalaciones. Se trata de un punto importante en la etapa inicial del diseño de un sistema y tiene una gran repercusión en la viabilidad a largo plazo del sistema. Una planta mal diseñada repercute en procesos improductivos, en los que se premia la inadecuada organización de materiales, mayores tiempos de entrega de la producción, o un aumento del tiempo de proceso productivo, lo que dará como resultado una reducción de la productividad.

En general, la función objetivo más habitual para resolver el problema de disposición de las instalaciones se centra en reducir el coste de manipulación de los materiales (MHC) (V.Madhusudanan Pillai, Irappa Basappa Hunagund, 2011).

Según Chan (Chan, Chan and Kwong, 2004), el MCH asume alrededor del 20-50% del coste operativo total de las instalaciones. Una buena planificación, puede reducir estos costes en al menos un 10-30%, y así, aumentar la productividad. El problema del diseño de las instalaciones es una propuesta costosa a largo plazo, y cualquier modificación o reordenamiento planificado de manera eficiente, puede reducir estos costes y, por lo tanto, aumentar la productividad.

El diseño y distribución de instalaciones en una planta se ocupa por tanto de la ubicación y disposición de los departamentos, células o máquinas. En un entorno competitivo, los mercados son heterogéneos y de naturaleza volátil. Para que una empresa de fabricación mantenga su productividad en condiciones de demanda volátil, su proceso de producción debe configurarse de manera estable. La capacidad de diseñar y operar instalaciones de fabricación, que puedan adaptarse rápida y eficazmente a los cambiantes requisitos tecnológicos y de marketing, es cada vez más importante para el éxito de cualquier organización de fabricación. Por lo tanto, las instalaciones de fabricación deben poder exhibir altos niveles de flexibilidad y robustez, para hacer frente a cambios significativos en sus requisitos operativos.

2.2. Factores que influyen en la distribución en planta

Para establecer una correcta disposición de planta, es importante conocer cómo se relacionan entre sí todos los factores implicados en el proceso. La distribución en planta, tratará de equilibrar las características y consideraciones de cada factor, obteniendo la máxima ventaja de cada uno de ellos. Algunos de estos factores son (Cárdenas, 2017):

- **Materiales:** se trata de uno de los factores más importantes, ya que están presentes en todo el proceso productivo. Se requiere estudiar el material que sale, el que entra, las piezas que se rechazan, los desperdicios que quedan, etc.
- **Maquinaria:** para el diseño de la planta, habrá que tener claro cuáles son las máquinas que más se utilizan, qué espacios ocupan, las que son más ruidosas, la secuencia del proceso de producción, etc.
- **Mano de obra:** es el recurso más flexible en el proceso, ya que puede tratar cualquier material, trasladarse y realizar distintas actividades.
- **Movimientos de los materiales:** hay que tratar de reducir el cruce de circulación de material, descongestionar pasillos y áreas exclusivas de trabajo, disminuir las distancias en el traslado, etc.
- **Edificio o planta:** tener en cuenta que las infraestructuras sean las más adecuadas, en las que se puedan adaptar las necesidades que los productos y los servicios requieran.

2.3. Ventajas de la distribución en planta

Como se ha comentado anteriormente, las ventajas de una buena distribución en planta, hace que se reduzcan los costes de fabricación y se creen sistemas productivos y eficientes. Las principales ventajas se resumen en los siguientes puntos (Heizer and Render, 2012):

- **Incremento de la producción:** conlleva a que haya una mayor producción de igual coste o incluso mejor calidad, con menor relación de hombres-hora y una reducción del tiempo de funcionamiento de las máquinas que se utilicen.
- **Disminución de los retrasos en la producción:** una correcta ordenación de las operaciones que requieran

el mismo tiempo o uno parecido, puede eliminar los tiempos en los que las piezas permanezcan en pausa.

- **Utilización efectiva de todo el espacio:** las distancias excesivas entre máquinas, la inadecuada disposición de tomas de corriente, el stock, el material en espera o los pasillos, ocupan una gran cantidad de espacio, que se soluciona con una buena distribución en planta.
- **Reducción del manejo de materiales:** esta disminución se podría conseguir con una ordenación en cadena de la línea de montaje, que permitiría reducir considerablemente el transporte de las piezas.
- **Mayor utilización de la maquinaria, mano de obra y servicios:** una buena distribución en planta, maximiza la utilización de los recursos que resulten más costosos para una empresa.
- **Mínimo esfuerzo y seguridad en los trabajadores:** permite estudiar minuciosamente, los lugares donde se encuentran los empleados. Por ejemplo, el diseño debería contemplar que las herramientas no se dejen en los pasillos, que no se trabajen cerca de productos químicos, etc.

2.4. Principios de la distribución en planta

Los principios que se deben seguir a la hora de diseñar una distribución en planta óptima son los siguientes (Heizer and Render, 2012):

- **Principio de la satisfacción y seguridad:** a igualdad de condiciones, será más efectiva una distribución que consiga el trabajo en el proceso productivo de forma más segura y satisfactoria.
- **Principio de la integración del conjunto:** la mejor distribución es la que integra todos los recursos utilizados en el sistema productivo y que alcance el mejor compromiso entre todas las partes.
- **Principio de la mínima distancia recorrida:** a igualdad de condiciones, es siempre la mejor distribución aquella que permita la menor distancia a recorrer por el material.
- **Principio de la circulación de materiales:** distribuir las áreas de trabajo, de modo que cada operación esté en el mismo orden en el que se transforma la materia.
- **Principio de espacio cúbico:** maximizar todo el espacio posible que se utilice para generar eficiencia y productividad.
- **Principio de la flexibilidad:** siempre será más efectiva la distribución que pueda ser ajustada o reordenada con menos coste o inconvenientes.

2.5. Tipos de distribución en planta

Según las necesidades de cada proceso y las estrategias que se requieran, existen distintos tipos de distribuciones de instalaciones en planta (Ospina, 2016):

- **Distribución por producto:** los productos se fabrican en un área de trabajo específico, en el que se ve un flujo constante de materiales. El proceso de fabricación del producto, se realiza secuencialmente por lo que los recursos estarán situados según el diagrama del proceso del producto.
 - El material en curso de fabricación se desplaza de un puesto a otro, lo que conlleva la mínima cantidad del mismo en almacén.
 - El problema que puede ocasionar este tipo de distribución en planta, es que, si existe una incidencia en una máquina cualquiera, puede ocasionar la parada del proceso productivo en su conjunto.

- **Distribución en planta por proceso:** en esta distribución se agrupan todas las operaciones por el mismo tipo de proceso, es decir se agrupan los recursos de acuerdo a las mismas características funcionales.
 - El material se desplaza entre puestos diferentes dentro de la misma sección o de una sección a la siguiente que corresponda, pero el itinerario nunca es fijo.
 - Una avería producida en un puesto de trabajo no incide en el funcionamiento de los restantes, por lo que no se causan retrasos acusados en la fabricación.
- **Distribución por posición fija:** el material permanece en un lugar fijo, todos los equipos necesarios para la fabricación del producto, herramientas y maquinaria son dirigidos hacia éste.
 - Algunos ejemplos de esta distribución son los montajes de calderas en edificios, barcos y en general, montajes a pie de obra.
 - Cada tipo de distribución presenta diferentes ventajas, pero se tiene que elegir la mejor para cumplir con los objetivos planteados y solucionar los problemas detectados en la empresa.

2.6. El problema de distribución en planta en tres capas

Para proponer un problema de diseño en contexto, las entidades y actividades relevantes para el problema de diseño se pueden organizar en un modelo en capas (Meng, Heragu and Zijm, 2004). El modelo de referencia tiene tres capas físicas:

- Mezcla de productos
- Tipos de máquinas
- Ubicaciones en el taller

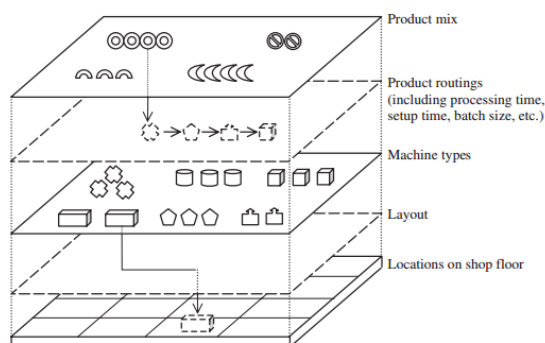


Figura 1 Esquema del modelo de 3 capas -Meng, Heragu y Zijm (2004)

La mezcla de productos incluye los tipos de productos que deben producirse y sus volúmenes de llegada (parámetros relacionados con la demanda). Cada máquina disponible pertenece a un tipo de máquina. El número de ubicaciones en el taller es igual al número total de máquinas. Las dos capas lógicas del modelo de referencia denotan las actividades de diseño involucradas.

El problema asigna cada producto a una secuencia según el tipo de máquina. El proceso de asignación lo lleva a cabo la primera capa lógica, que contiene la rutas, el tiempo de procesamiento, tiempo de configuración de las máquinas, etc. Una vez establecidos los datos anteriores, el producto se asignará a las máquinas que mejor cumplan las características mencionadas anteriormente.

Posteriormente, este problema de diseño trata de encontrar un mapeo uno a uno que asigne cada tipo de máquina

en una ubicación de la planta. La segunda capa lógica establece la planta a diseñar, que, junto con las máquinas, dará como resultado la distribución en planta definitiva.

La tercera capa lógica (no mostrada) se refiere al problema de programación, donde se fijan los tipos de máquina en una ruta de producto a máquinas específicas en ubicaciones específicas del taller, y coordina el tiempo, la secuencia y la priorización de todas las órdenes de trabajo asignadas a una máquina.

Por definición, el problema de distribución en planta es una simple asignación de n máquinas a n ubicaciones en la planta de distribución. Este problema se vuelve más complejo de resolver cuando se deben tener en cuenta varios contextos de diseño en tiempo real. Una típica empresa de fabricación actual, se enfrenta a un producto de constante cambio de productos y volúmenes, que hacen necesario actualizar el diseño en consecuencia para operar de manera eficiente.

2.7. Modelos matemáticos del problema de distribución en planta

La Investigación Operativa es una de las disciplinas más importantes de la ingeniería en general. Su tarea es la de identificar y formular problemas que se presentan en sistemas productivos o en situaciones que puedan aplicarse a este tipo de formulaciones (Gómez, 2012).

Este apartado, se centrará en mostrar distintas formulaciones que se han planteado del problema de distribución en planta desde la investigación operativa. Lo que se busca con estas formulaciones, es identificar y modelar variables de decisión del problema, con las que se generará una función objetivo para su evaluación, y definir las restricciones del problema. El problema utilizará como función objetivo los factores que afecten más en el sistema analizado, que medirán el desempeño del sistema. Las variables de decisión se modifican para encontrar la solución óptima del problema.

“Facility Layout Problem (FLP)” es la forma en la que se definen los problemas de distribución en planta, que consisten en la asignación de los recursos a ubicaciones en una planta, y son los problemas que abordaremos en este apartado (Amine and Henri, 2007). Existen muchas variantes del problema de distribución en planta; en este apartado veremos las más frecuentes.

2.7.1. El problema estático de distribución en planta

Este apartado comenzará con uno de los problemas más simples de distribución en planta en la investigación operativa. El problema estático de distribución en planta, *The Static Plant Layout Problem (SPLP)*, minimiza los costes totales de manipulación de materiales, asociados a la asignación de diferentes instalaciones a distintas ubicaciones, generalmente formulado como un problema de asignación cuadrática (*Quadratic assignment problem, QAP*).

En la formulación de asignación cuadrática, el diseño de distribución en planta puede verse como un problema combinatorio en el que las instalaciones indivisibles (por ejemplo, departamentos o estaciones de trabajo de empleados individuales) deben asignarse a ubicaciones fijas en una planta industrial (Loiola, 2005). Se asume que todas las instalaciones tienen el mismo tamaño y forma, y las opciones para las instalaciones se especifican de antemano. Pero en los problemas del mundo real, las instalaciones suelen tener desigualdades de tamaños, que hacen que el modelo sea limitado en su uso.

En principio, sería posible resolver este problema mediante una enumeración exhaustiva de todas las formas posibles de asignar instalaciones a las ubicaciones, y mediante la selección de una planta que satisfaga las

limitaciones dadas se obtiene el valor mínimo para la función objetivo. En la práctica, esto resulta inviable para problemas de tamaño realista (problemas de más de 15 instalaciones) ya que el número de combinaciones de instalaciones y ubicaciones involucradas puede ser enorme (García, 2020).

Por último, se puede demostrar que los problemas de asignación cuadrática pertenece a una clase de problemas matemáticos conocidos como NP-completos (Loiola, 2005).

Es un modelo que se utiliza en muchos problemas de la vida real en áreas como instalaciones, ubicaciones, computación y análisis de datos combinatorios.

Vamos a plantear el modelo matemático en su formulación más común, donde el número de ubicaciones es igual al número de instalaciones. Los costes se van a asociar a los desplazamientos entre ubicaciones (en general proporcional a las distancias entre las mismas), y también se van a añadir costes fijos de asignación de cada instalación a cada ubicación.

El problema estático de distribución en planta, se formula (Rosenblatt, 1986):

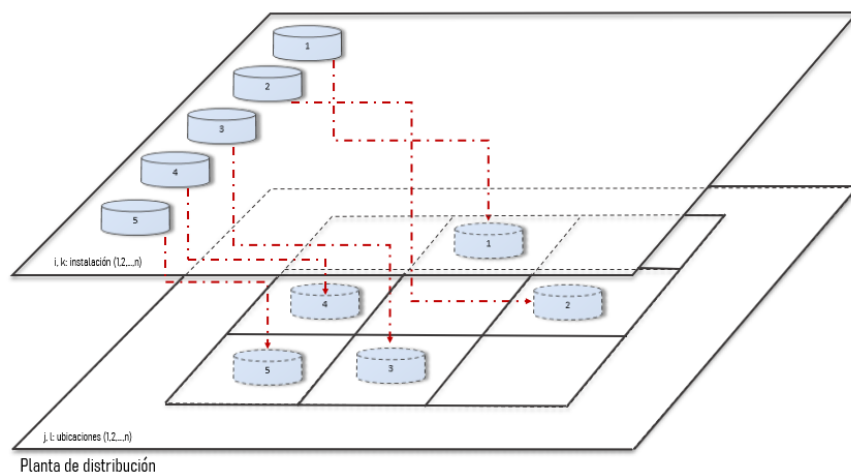


Figura 2 Gráfico del problema estático de distribución en planta

- **Índices:**

i, k : instalaciones (1,2,...,n)

j, l : ubicaciones (1,2,...,n)

- **Parámetros:**

c_{ij} : coste fijo asociado directamente al asignar una instalación i a una ubicación j .

d_{jl} : coste de viaje unitario desde la ubicación j a la ubicación l ("distancia"), donde $d_{jj}=0$.

f_{ik} : flujo de trabajo o cantidad de movimientos desde la instalación i y la instalación k .

a_{ikjl} : coste total de asignar la instalación i a la ubicación j y la instalación k a la ubicación l , donde:

$$a_{ikjl} = \begin{cases} f_{ik}d_{jl} & \text{if } i \neq k \text{ or } j \neq l, \\ f_{ii}d_{jj} + c_{ij} & \text{if } i = k \text{ or } j = l, \end{cases}$$

- **Variables:**

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{"1" si la instalación } i \text{ se asigna a la ubicación } j; \\ 0 & \text{"0" en otro caso.} \end{cases}$$

- **Modelo:**

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijkl} X_{ij} X_{kl} \quad (1)$$

s.a

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$X_{ij} = (0,1)$$

Como función objetivo (1) se minimizan los costes totales asociados a la asignación de las diferentes instalaciones a las diferentes ubicaciones y a los costes de desplazamientos.

En cuanto a las restricciones:

- (2) En cada ubicación se asigna una única instalación.
- (3) Cada instalación se asigna a una única ubicación.

Las variables X, se encargarán de establecer cuál es la ubicación óptima de cada instalación del problema. Se tratan de variables binarias de decisión, las cuales valdrán 1 si una instalación se asigna a una ubicación, y valdrán 0 en caso contrario.

2.7.2. El problema dinámico de distribución en planta

De forma opuesta al anterior modelo, donde las condiciones de distribución en planta son estáticas, el problema dinámico o *Dynamic Facility Layout Problem (DFLP)*, supone que existen cambios en las condiciones de mercado y/o de producción. En este tipo de problemas, se dan soluciones temporales para horizontes limitados de producción, basándose en los costes de manejo de materiales, a los que se les añaden los costes derivados de redistribuir las instalaciones en la planta al inicio de cada periodo de tiempo. Para ello, se define el número de periodos de tiempo para los que se planificará la distribución (Gómez, 2012).

La decisión involucrada en el DFLP, hace referencia en calcular el diseño en cada período, o en qué medida, si corresponde, deben realizarse cambios en el diseño.

El diseño resultará en costes variables dependiendo de las instalaciones involucradas en este cambio. Los costes de reordenamiento (cambios) pueden verse como costes fijos y dependientes de las instalaciones implicadas en el cambio y de las distancias entre las distintas ubicaciones o cualquier combinación de las anteriores (V.Madhusudanan Pillai, Irappa Basappa Hunagund, 2011):

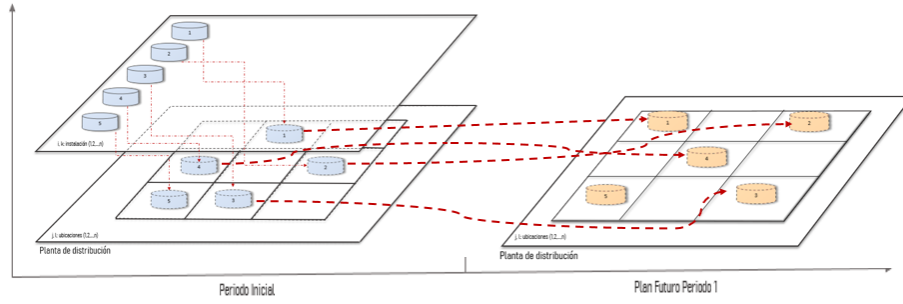


Figura 3 Gráfico del problema dinámico de distribución en planta

- **Índices:**

p: número de períodos en el horizonte de planificación (1,2,...P)

i, k: instalaciones (1,2,...n)

j, l: ubicaciones (1,2,...n)

- **Parámetros:**

d_{jl} : coste de viaje unitario desde la ubicación j a la ubicación l ("distancia"), donde $d_{jj}=0$.

$f_{p,ik}$: flujo de trabajo o cantidad de movimientos desde la instalación i y la instalación k en el periodo p

$A_{p,i,jl}$: coste de recolocación de la instalación j en el período p si se desplaza desde la ubicación j a la ubicación l .

- **Variables:**

$X_{p,ij} = \begin{cases} 1 & \text{"1" si la instalación } i \text{ se asigna a la ubicación } j \text{ en el periodo } p, \\ 0 & \text{"0" en otro caso, "0" en otro caso} \end{cases}$

$Y_{p,i,jl} = \begin{cases} 1 & \text{"1" si la instalación } i \text{ se desplaza de la localización } j \text{ a } l \text{ al inicio del periodo } p, \\ 0 & \text{"0" en otro caso} \end{cases}$

- **Modelo:**

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{p,ik} d_{p,jl} X_{p,ij} X_{p,kl} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n A_{p,i,jl} Y_{p,i,jl} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.a} \\ \sum_{j=1}^n X_{p,ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad p = 1, \dots, P \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^n X_{p,ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n \quad p = 1, \dots, P \quad (3)$$

$$Y_{p,i,jl} = X_{(p-1),ij} X_{p,il} \quad i, j, l = 1, \dots, n \quad p = 2, 3, \dots, P \quad (4)$$

$$X_{p,ij} = (0,1); Y_{p,i,jl} = (0,1)$$

Como función objetivo (1) se minimizan los costes totales asociados a los costes de desplazamientos entre las diferentes ubicaciones y a los costes de reubicación de instalaciones de un periodo a otro cuando la demanda es variable (entorno dinámico).

En cuanto a las restricciones:

- (2) En cada periodo, a cada ubicación se asigna una única instalación.
- (3) En cada periodo, cada instalación se asigna a una única ubicación.
- (4) Las relaciones entre las variables X e Y: si la instalación i se asigna a la ubicación j en un periodo y a la ubicación l en el periodo siguiente, entonces la variable Y correspondiente se activará.

El diseño propuesto para el entorno dinámico es más efectivo cuando las instalaciones son difíciles de reubicar, el coste de la reubicación es demasiado alto y las posibilidades de interrupción operativa son altas debido a la reorganización.

2.7.3. El problema de distribución en planta continuo con tamaño rectangular de instalaciones

Para solventar las desventajas del problema de distribución en planta con ubicaciones conocidas y cuya formulación se presenta como un problema de asignación cuadrática (QAP), los investigadores desarrollaron modelos más cercanos a los reales, incluyendo tamaños desiguales de las instalaciones y ubicaciones no predeterminadas. La mayor parte de las investigaciones plantearon modelos de programación mixtos-enteros (*Mixed Integer Programming*, MIP), cuya resolución requiere el uso de técnicas como el Branch and Bound o métodos de los planos de corte (Zhang and Che, 2014).

Un problema muy común de distribución en planta con instalaciones desiguales ocurre cuando existen tamaños rectangulares desiguales de cada instalación, no se conocen las ubicaciones y hay que situar cada instalación en un plano (bi-dimensional) sin que se solapen sus superficies.

Se conoce por tanto de cada instalación su representación rectangular (largo y ancho) y las distancias mínimas requeridas entre cada dos instalaciones, tanto horizontal como verticalmente. Dependiendo de lo simplificada o compleja que sea la formulación seleccionada se puede tomar la ubicación en el plano como una variante discreta y valores enteros, o se pueden tomar valores continuos, algunos de estos factores se deciden teniendo en cuenta el tamaño de la planta, y el número de instalaciones a distribuir (Gómez, 2012).

Para la función objetivo se suelen usar los costes de desplazamientos como en los problemas QAP, aunque en estos casos no se conocen a priori las distancias entre las ubicaciones. En general se conocen los flujos de trabajo o cantidad de movimientos entre las instalaciones, y el coste de cada unidad que se mueve entre las instalaciones.

El modelo MIP que se formula es el problema continuo con representación rectangular de las instalaciones (Welgama, 1995):

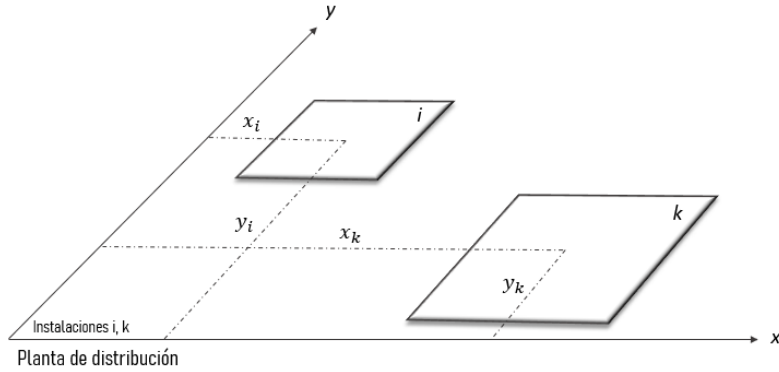


Figura 4 Gráfico del problema en planta continuo con tamaño rectangular de instalaciones

- **Índices:**
i, j: instalaciones (1,2,...n)
- **Parámetros:**
 f_{ij} : flujo de trabajo o cantidad de movimientos desde la instalación i y la instalación j.
 c_{ij} : coste de flujo por unidad de distancia entre las instalaciones i y j.
 l_i : longitud horizontal de la instalación i.
 b_i : longitud vertical de la instalación i.
 dh_{ij} : distancia horizontal mínima requerida entre las instalaciones i y j.
 dv_{ij} : distancia vertical mínima requerida entre las instalaciones i y j.
- **Variable:**
 x_i , y_i : coordenadas horizontal y vertical respectivamente en las que se ubica el centro de la instalación i.
- **Modelo:**

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} f_{ij} (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \quad (1)$$

$$\text{s.a} \quad |x_i - x_j| \geq 1/2 |l_i - l_j| + dh_{ij} \quad (2)$$

$$|y_i - y_j| \geq 1/2 |b_i - b_j| + dv_{ij} \quad (3)$$

$$x \in Z, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad j = 2, 3, \dots, n.$$

Como se ha mencionado anteriormente, la función objetivo (1) minimiza los costes de flujos por movimientos según se han definido los parámetros.

Las restricciones (2) y (3) evitan que se solapen instalaciones en la configuración que se genere.

2.7.4. El problema de distribución en planta con células de fabricación

Este enfoque consiste en la agrupación de distintas máquinas en células de fabricación para el procesado de una

familia de partes o componentes en cada célula. La creación de las familias de partes se hará en función de las similitudes existentes en sus procesos de fabricación, es decir, en el uso de máquinas comunes.

La distribución en planta consistirá por un lado en la determinación de las ubicaciones de cada célula dentro de la planta y por otro lado en la asignación de la ubicación concreta de cada máquina en el interior de cada célula (Romero Duque, Mejía Moncayo and Torres Martínez, 2015).

La formación de las células de fabricación se basa por tanto en determinar una distribución en planta basada en movimientos inter/intra celulares:

- **Distribución en planta intracelular:**

Consiste en la asignación de las máquinas que conforman las células a una posición determinada dentro de éstas, las cuales deben ser también asignadas a una determinada posición respecto al resto de células.

La posición que ocupará cada máquina en la célula puede asignarse considerando el espacio discreto, caso en el cual cada máquina se asigna a una posición determinada previamente, o manejando el espacio de forma continua, donde se determinan las coordenadas de posición de cada máquina (Romero Duque, Mejía Moncayo and Torres Martínez, 2015).

- **Distribución en planta intercelular:**

Este problema, se plantea de manera que se consideren los flujos de materiales entre las células como un problema de asignación.

Entre los autores que abordan el problema de distribución en planta con células de fabricación planteando modelos matemáticos se han analizado los siguientes:

- Chang et al. (2013) plantean un modelo matemático en dos etapas para resolver el **problema de distribución en planta estático con células de fabricación y rutas alternativas** para cada componente a fabricar. En una primera etapa (distribución en planta intercelular) se plantea un modelo matemático con distancias entre células conocidas y varias rutas por cada componente, de forma que las variables de decisión consisten en elegir a qué célula se asigna cada máquina y con qué ruta se fabrica cada componente, minimizando la distancia intercelular recorrida. En la segunda etapa (distribución en planta intracelular) se plantea un modelo matemático que maximiza el flujo consecutivo hacia adelante y las variables de decisión consisten en la asignación de máquinas a posiciones en las células. El problema es resuelto mediante un algoritmo de búsqueda tabú.
- Forghani et al. (2015) plantean un modelo matemático integrado para resolver el **problema de distribución en planta continuo con células de fabricación con tamaño rectangular de cada célula** y número de posiciones conocidas dentro de cada célula. Los autores plantean varias cotas inferiores de las soluciones y lo resuelven proponiendo una heurística para el problema.

En el artículo, “The facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives” (Meiler and Gau, 1996), se realiza una investigación exhaustiva sobre heurísticas en problemas de distribución de instalaciones. En este artículo se escoge una muestra de algunos enfoques aplicados al problema de distribución en planta que utilizan este tipo de algoritmos:

- **CRAFT:** *Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*, desarrollado por Armor and Buffas en 1963. Este enfoque comienza determinado el centroide de cada departamento en el diseño para realizar intercambios bidireccionales o tridireccionales de los centroides de instalaciones no fijas, que también son iguales en área o adyacentes en el diseño actual. Para cada intercambio, CRAFT calculará una reducción estimada del coste y elige el intercambio con la mayor reducción estimada. Finalmente, intercambia los departamentos exactamente y continúa hasta que no exista una reducción estimada debido a los intercambios de dos o tres vías.
- **MAT:** *Modular Allocation Technique*, propuesto por Edwards and Guillet (1970), enfoque que clasifica el par de instalaciones según sus valores de flujo y los pares de ubicación según sus valores de distancia. Una vez realizada la clasificación, esta información se utiliza para determinar un diseño, que permite al usuario asignar instalaciones a cualquier ubicación deseada (García, 2020).
- **SHAPE:** desarrollado por Hassan, Hogg y Smith en 1986, es un algoritmo de construcción que utiliza una representación discreta y un objetivo basado en distancias rectilíneas entre centroides de departamento. La secuencia de selección del departamento depende de la clasificación, que se baja en los flujos de cada departamento y un valor de flujo crítico definido por el usuario. Sin embargo, debido a que la forma de la instalación está controlada por la función objetivo, la forma de las instalaciones puede deteriorarse hasta el final.
- **NLT:** *Nonlinear optimization Layout Technique*, trata de un algoritmo de construcción desarrollado por Camp, Carter y Vannelli en 1991, basado en técnicas de programación no lineal y que utiliza distancias euclidianas entre centroides departamentales. En este modelo, hay tres conjuntos de restricciones, que indican que los departamentos no pueden superponerse, no pueden ubicarse fuera de las instalaciones y no se les puede asignar un área menos de lo querido. Los autores transformaron el modelo en uno sin restricciones a través del uso de la función de penalización cuadrática del punto exterior, con un enfoque de tres etapas sucesivas, en el que los problemas más complejos se resuelven utilizando los de la anterior como un punto de una solución inicial.
- **QLAARP:** *Qualitative Layout Analysis using Automated Recognition of Patterns*, enfoque de construcción desarrollado por Banerjee en 1992, que utiliza anomalías de diseño cualitativas para establecer variables binarias en el MIP de Montreuil. El algoritmo utiliza heurísticamente información basada en el contexto para reducir el árbol de soluciones. Se utiliza un esquema de diseño para estructurar el diseño cualitativo.
- **H63:** desarrollado por Hillier en 1963. Este algoritmo se basa en una tabla de deseabilidad de movimientos que consta de valores que representan los cambios de costo que resultarán al mover una instalación de su ubicación actual a una adyacente (García, 2020).
- **FRAT:** desarrollado por Khalil en 1973. Este algoritmo utiliza principios de otros algoritmos como CRAFT y H63. Primero, determina la diferencia entre la distancia más larga y la más corta, y posteriormente, el algoritmo lleva a cabo el procedimiento de determinación del costo total y el procedimiento del intercambio. Este algoritmo solo se aplica a problemas con instalaciones de áreas iguales.
- **MULTIPLE:** *MULTI-floor Plant Layout Evaluation*, es un algoritmo de mejora de uno o varios pisos desarrollado por Bozer, Meller y Erlebacher en 1994. MULTIPLE utiliza una representación discreta y extiende al método CRAFT aplicando las curvas de relleno del espacio. Dicho enfoque supuso una mejora para CRAFT al aumentar el número de intercambios considerados en cada iteración. También, se puede restringir la irregularidad de las formas de las instalaciones mediante el uso de una medida de irregularidad. Sin embargo, debido a que se utiliza la representación discreta, las formas de las instalaciones pueden no ser rectangulares.

2.8.2. Algoritmos metaheurísticos

Para poder proporcionar una solución satisfactoria a problemas que no tienen un algoritmo o heurística específica, se aplican las metaheurísticas. La mayoría de las metaheurísticas tienen como objetivo final la resolución de problemas de optimización combinatoria.

2.8.2.1. Algoritmos genéticos

Son algoritmos que imitan al proceso de la evolución natural. Se utilizan para proporcionar soluciones factibles para problemas de búsquedas y optimización.

Estos algoritmos, se basan en algoritmos evolutivos que utilizan algunas técnicas como la herencia, la mutación, la selección y el cruce, como ocurre en la evolución natural. La aparición de estos algoritmos se generó para solucionar problemas complejos que surgieron en muchos sectores industriales y de servicio, que resultaron los más difíciles de resolver con los métodos más conocidos que había en su momento. Este método, no da una solución óptima, pero si una buena aproximación.

El punto de partida es una población inicial (generada aleatoriamente). La población sufre una serie de transformaciones diseñadas para mejorar las soluciones proporcionadas. Tales transformaciones se realizan en el bucle principal del algoritmo, y tiene tres etapas básicas (Gómez *et al.*, 2003):

1. La etapa de selección consiste en muestrear la población inicial, obteniendo así una nueva población con el mismo número de individuos que la principal. Esta etapa tiene como objetivo mejorar la calidad de la población favoreciendo aquellos individuos que son más adecuados para un problema particular. El individuo se mide calculando su aptitud, que indica lo buena que es una solución.
2. La etapa de reproducción emplea lo que se llama “operadores genéticos” y cruce y mutación. En general, el operador de cruce funciona tomando dos individuos, llamados “padres” e intercambiando parte de sus cadenas, generando así nuevos individuos, llamados “descendientes”. Por otro lado, la mutación se aplica a una descendencia y altera su cadena de alguna manera, por ejemplo, cambiando el orden de algunos de sus departamentos. Al final de esta etapa, hay dos poblaciones independientes, la de los padres y su descendencia. El número de individuos a reproducir no se establece de antemano. Cuanto menor sea el valor de la probabilidad de los operadores, menor es el número de personas que se reproducirán.
3. La etapa final del proceso se llama reemplazo y consiste en formar una nueva población mezclando las dos iniciales.

Pan, Yu and Du (2018), para mejorar la planificación del diseño en el almacén, el modelo matemático y el modelo de simulación se basan en la base del método tradicional de planificación del sistema. Debido a la baja eficiencia del cálculo de la simulación, proponen en su artículo, un método de optimización de dos etapas basado en un algoritmo genético y un método de simulación.

Según los resultados, la optimización de dos etapas evita la interferencia de factores humanos que existe en el método tradicional, con las ventajas de un modelo matemático y de simulación, y así, obtener una planificación de diseño más integrada y lógica. *K. Tam (1992)* aborda el problema de diseño en planta utilizando algoritmos genéticos. El objetivo es minimizar el flujo ponderado de tráfico, satisfaciendo al mismo tiempo las diversas limitaciones geométricas y de área de las instalaciones individuales. El uso del algoritmo genético permite una búsqueda efectiva del espacio de la solución al muestrear diferentes regiones del espacio.

2.8.2.2. Búsqueda Tabú

La búsqueda tabú es una metaheurística que utiliza el sentido común para permitir el proceso de búsqueda para escapar de un óptimo local (Leimkuhler, 1968).

Un procedimiento de búsqueda local opera como procedimiento de mejora local, y la mejora se repite hasta no se requiera un nuevo ensayo. La solución que se encuentre en cada iteración debe ser mejor que la prueba anterior. El proceso empieza con un procedimiento de mejora local de la manera habitual (es decir, aceptando solo una solución mejorada en cada iteración) para encontrar un óptimo local. Una estrategia clave de la búsqueda tabú es que luego continúa la búsqueda permitiendo movimientos que no mejoren hacia las mejores soluciones del óptimo local. Una vez que se alcanza un punto donde las mejores soluciones se encuentran cercanas a la solución actual, el procedimiento se vuelve a aplicar para encontrar un nuevo óptimo local.

La búsqueda tabú prohíbe temporalmente los movimientos que regresarían a una solución visitada recientemente. Por este motivo, existe una lista tabú que registra los movimientos prohibidos, que se conocen como movimientos tabúes. La única excepción a prohibir tal movimiento es si se encuentra que un movimiento tabú es mejor que la solución factible encontrada hasta ahora.

Por último, la búsqueda tabú también puede incorporar algunos conceptos más avanzados. Uno es la intensificación, que implica explorar una parte de la región factible más a fondo que lo habitual, después de que se haya identificado una porción prometedora que contenga buenas soluciones. Otro concepto sería la diversificación, que implica forzar la búsqueda en áreas previamente inexploradas de la región factible.

Algunos de los autores, que han estudiado este algoritmo, lo han aplicado a problemas de distribución en planta. *Taillard (1991)*, analiza la adaptación de la búsqueda tabú al problema de asignación cuadrática. Con el fin de mejorar la velocidad de la búsqueda tabú, en su estudio, propuso dos métodos de paralelización que muestran sus eficiencias para un número de procesadores proporcionales al tamaño del problema. Con este procedimiento, se mejoran las soluciones publicadas para grandes problemas y se encuentran, también, mejores soluciones para problemas menores. Además, propuso una forma fácil de general problemas aleatorios, que, como resultado, se obtienen buenas soluciones. *Skorin (1989)* describe una adaptación de la búsqueda tabú para realizar el problema de la asignación cuadrática. Realiza experimentos computacionales con diferentes valores de parámetros y diferentes estrategias para algunos QAP generados aleatoriamente, con una dimensión que varía entre 42 y 90.

El método se implementó de forma flexible, lo que permite al usuario interactuar y cambiar los parámetros (lista tabú, el límite de interacción, parámetro de diversificación y el número de nuevas soluciones iniciales) durante la ejecución.

2.8.2.3. Recocido simulado

El algoritmo de recocido simulado se basa en el proceso de recocido de metales sólidos o cerámicas donde la temperatura del material varía con el objetivo de cambiar sus propiedades físicas. Por analogía, este proceso se aplica para resolver problemas de optimización, donde, en cada iteración, algunos vecinos son evaluados con una cierta probabilidad para decidir si se cambia a un nuevo estado o, por el contrario, se permanece en el actual (García, 2020).

Existen autores que han aplicado este algoritmo para resolver problemas de distribución en planta. Por ejemplo, *Kouvelis, Chiang and Fitzsimmons (1992)* abordan el problema de la distribución de la máquina en presencia de restricciones de zonificación. Modificaron la formulación QAP para tener en cuenta tales restricciones. Para resolverlo, implementaron dos procedimientos distintos del recocido simulado, los de compulsión y penalización.

Los resultados computacionales, comparando los distintos procedimientos, es más favorecedor el de compulsión. El método de penalización puede resultar atractivo para los diseñadores de distribución debido a la facilidad de implementación para cualquier tipo de restricciones. Los resultados indican que imponer restricciones generadas de forma inteligente en los procedimientos de recocido simulado para formulaciones QAP pueden mejorar significativamente la eficacia de la solución.

Otro de los autores, *Tam (1992)*, presenta un procedimiento de diseño computarizado que se utiliza para asignar espacios a las celdas de fabricación en un plano de planta designado. El objetivo es encontrar, mediante recocido simulado, un diseño de celdas que minimice simultáneamente el flujo ponderado de partes entre celdas y satisfaga las diversas restricciones geométricas. *Suresh and Sahu (1993)* abordan el problema del multiobjetivo de planificación del diseño. Hicieron unos del algoritmo de recocido simulado, que se convirtió en una herramienta muy útil para resolver una variedad de combinaciones. La ventaja de usar este enfoque radica en el hecho de que el algoritmo intenta evitar que la solución quede atrapada en un mínimo local aceptando movimientos con una probabilidad limitada. Otra característica importante, que mencionan de este algoritmo, es la no dependencia de la solución final sobre la solución inicial.

3. LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN RECONFIGURABLES

Para la realización de un trabajo, un industrial prevé tanto el trabajo de sus obreros como las herramientas que emplea.

- David Hume -

Las demandas de productos están cambiando rápidamente, tanto en cantidad como en variedad, y los fabricantes deben proporcionar numerosos productos en un tiempo limitado de forma rentable. Como resultado, surgen nuevos paradigmas de fabricación, entre ellos los sistemas de fabricación reconfigurables. Al contrario que los sistemas de fabricación convencionales, que rara vez cambia el diseño inicial del sistema, estos sistemas reconfigurables modifican su diseño adaptándose a la demanda. En este apartado, se introducirán los sistemas de fabricación reconfigurables, sus ventajas y algunos de los métodos que se están aplicando en la literatura para su resolución.

3.1. Introducción a los sistemas de fabricación reconfigurables (RMS).

A finales del siglo XX, la industria de la fabricación entró en una nueva era en la que todas sus empresas debían competir en una economía global. La competencia global aumenta el poder adquisitivo de los clientes, lo que, a su vez, impulsa la introducción frecuente de nuevos productos y provoca grandes fluctuaciones en la demanda de los mismos.

Para mantenerse competitivas, las empresas de fabricación deben utilizar sistemas que no solo produzcan sus bienes con alta productividad, sino que también permitan una respuesta rápida a los cambios del mercado y las necesidades de los consumidores. Una nueva capacidad de fabricación que permita un lanzamiento rápido de la producción de nuevos productos, con cantidades de producción que pueden variar inesperadamente, se ha convertido en una necesidad. Los sistemas de fabricación reconfigurables, en inglés, *Reconfigurable Manufacturing Systems* (RMS), ofrecen esta capacidad (Ayadehe *et al.*, 2010).

Los sistemas de fabricación reconfigurables son sistemas flexibles, no solo por su capacidad para producir una amplia variedad de productos, sino por su capacidad de cambiar el sistema de fabricación en sí mismo. No corren el riesgo de quedar obsoletos, ya que permiten cambiar los componentes del sistema. Son sistemas abiertos, por lo que se pueden mejorar continuamente mediante la implantación de nuevas tecnologías. También pueden ser rápidamente reconfigurados para fabricar futuros productos sin necesidad de ser reemplazados o eliminados (Galán *et al.*, 2006).

Un sistema de fabricación reconfigurable se diseña para un rápido ajuste de su capacidad productiva y de su funcionalidad, para responder a las necesidades del entorno, mediante el cambio o recolocación de sus componentes (Koren *et al.*, 1999).

El concepto de RMS es el de una fábrica viva y en evolución que se adapta rápidamente a los nuevos productos y las cambiantes demandas del mercado, cuyo concepto introdujo el Centro de Ingeniería de la Universidad de Michigan a mediados de 1990 (Leimkuhler, 1968).

3.1.1. ¿Qué es RMS?

En el anterior apartado, se ha comentado el origen del RMS y se ha dado una definición introductoria de lo que significan. Partiendo de esta base, se va a introducir el concepto de reconfigurabilidad.

La reconfigurabilidad, en el ámbito de la producción, es una tecnología de la ingeniería que se ocupa del diseño de máquinas de producción y sistemas de fabricación para una adaptación rápida y rentable para responder rápidamente a las modificaciones del mercado. Si el sistema y sus máquinas no están diseñados para el principio de la reconfigurabilidad, el proceso de hacerlo, resulta largo y poco práctico. El RMS, es, por tanto, un sistema de fabricación receptivo cuya capacidad de producción es ajustable a las fluctuaciones de la demanda del mercado y cuya funcionalidad es adaptable a los nuevos productos.

Algunos de los cambios que se producen en el mercado y que dan lugar a sistemas reconfigurables son (Koren *et al.*, 1999):

- La introducción de nuevos productos con mayor frecuencia.
- Cambios en piezas de productos existentes.
- Grandes fluctuaciones en la demanda y la mezcla de productos (mix de productos)
- Cambios en las regulaciones gubernamentales (seguridad y medio ambiente)
- Cambios en la tecnología de procesos.

Estos cambios son impulsados por una competencia económica agresiva a escala global, clientes más exigentes, y un ritmo rápido en la modificación de la tecnología de procesos.

Los sistemas de fabricación tradicionales difícilmente pueden cumplir con los requisitos dictados por el nuevo y competitivo entorno global. Las líneas de fabricación dedicadas, se basan en una automatización fija de bajo costo y producen unos productos o piezas principales de la empresa a gran volumen y durante un tiempo de ejecución prolongado. Por lo tanto, la capacidad de producción de los sistemas de producción flexibles suele ser menor que la de las líneas dedicadas y su costo inicial es mayor. Mientras que los sistemas de fabricación dedicados y flexibles están limitados en capacidad-funcionalidad, la capacidad de un RMS permite un cambio de funcionalidad con el tiempo a medida que el sistema reacciona a las circunstancias cambiantes del mercado (Ayadehe *et al.*, 2010).

3.1.2. Principales características de un RMS

En 1996, se desarrolló una investigación en ingeniería sobre los sistemas de producción reconfigurables llevadas a cabo por la "National Science Foundation". La investigación se creó para explicar y describir la ciencia que hay detrás de estos sistemas. Desde entonces, se definieron unos principios y características del RMS que, a día de hoy, hacen que un sistema sea reconfigurable.

Las características más comunes que suelen tener estos sistemas se suelen dar en los sistemas *software*, que se basan en controles modulares de arquitectura abierta que tienen como objetivo permitir la reconfiguración de controladores, y en los sistemas *hardware* de máquinas, a las que se le añaden herramientas modulares que tienen como objetivo ofrecer más opciones funcionales en las máquinas para satisfacer la demanda de los clientes. Esto conlleva a que todo sistema reconfigurable permita en su diseño del proceso de fabricación lo siguiente:

- Reconfiguración de todo el sistema
- Reconfiguración del hardware de la máquina
- Reconfiguración del software de control

Para lograr los objetivos mencionados anteriormente, los RMS están dotados de unas características comunes (Maganha, Silva and Ferreira, 2019):

- **Modularidad:** es la compartimentación de las funciones operativas en unidades que pueden manipularse

entre esquemas alternativos para una disposición óptima. Cuando es necesario, los componentes modulares se pueden reemplazar o actualizar para adaptarse mejor a las nuevas aplicaciones. La selección de los módulos básicos y la forma en que se conectan debe permitir la creación de sistemas que se pueden entregar, diagnosticar, personalizar y convertir.

- **Integración:** es la capacidad de integrar módulos, de forma rápida y precisa, utilizando interfaces de hardware y software. Por ejemplo, en el dominio del mecanizado, estas reglas deberían permitir a los diseñadores relacionar grupos de características de la pieza y sus correspondientes operaciones de mecanizado en módulos de máquina, permitiendo así la integración de grupo-proceso.
- **Personalización:** es la flexibilidad del sistema o máquina con respecto a una sola familia de productos. Los beneficios de la personalización dan lugar a una mayor productividad, precisión, tiempo de actividad y vida útil de la máquina y proporciona un beneficio económico sustancial al mejorar la productividad a bajo costo.
- **Convertibilidad:** es el diseño para los cambios de funcionalidad. El RMS debe contener mecanismos avanzados que permitan una fácil conversión entre piezas, así como métodos de detección y control.
- **Escalabilidad:** es el diseño para los cambios de capacidad. La escalabilidad puede requerir agregar módulos a una máquina para aumentar su productividad, o incluso sumar máquinas para ampliar la capacidad general del sistema a medida que crece el mercado.
- **Capacidad de diagnóstico:** es el diseño para facilitar el diagnóstico según las especificaciones que se necesiten. Tiene dos aspectos, la detección de fallos en la máquina e identificar las causas de calidad inaceptable de las piezas.

Estas características se aplican al diseño de sistemas de producción completos, así como a las máquinas, sus controladores y su software de control. También se pueden aplicar a recursos humanos y, en última instancia, a la empresa en su conjunto.

Según el libro "*Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*" (Ayadehe *et al.*, 2010), si se analizan las seis características mencionadas anteriormente, se pueden definir dos condiciones suficientes para la existencia de un RMS:

- Un sistema que posee las características de personalización y escalabilidad es un RMS.
- Un sistema que posee las características de personalización y convertibilidad es un RMS.

Por otro lado, la modularidad no se establece como un requisito común de estos sistemas, ya que con esta característica no se garantiza ni la capacidad ni los cambios de funcionalidad y con ello, se pueden hacer las siguientes declaraciones:

- Un sistema de fabricación que posee las características de modularidad e integrabilidad, tiene una alta probabilidad de ser un RMS.
- Las características de modularidad y diagnosticabilidad reducen el tiempo de reconfiguración del sistema y su tiempo de aceleración.

3.1.3. El proceso de diseño de sistemas de fabricación reconfigurables

A lo largo de este apartado, en el que se introducen los sistemas de fabricación reconfigurables, se han establecidos las principales características y objetivos. Una vez, que se tiene un concepto claro, se pondrá en marcha su diseño teniendo en cuenta todo lo anterior.

El proceso de diseño de RMS, según Isabela Maganha (Maganha, Silva and Ferreira, 2019) se puede dividir en

tres fases:

- **Diseño de layout:** que incluye la elección de máquinas y el diseño de sistemas de fabricación.
- **Diseño/selección del sistema de manejo de materiales:** que consiste en determinar el sistema de manejo de materiales que se utilizará.
- **Especificación del sistema de control:** que implica la interrelación entre componentes del sistema.

Por otro lado, según el artículo “Reconfigurable layout problem” (Meng, Heragu and Zijm, 2004) los pasos para enfrentarse a un problema RMS:

- Comprender cómo debe ser el diseño inicial de un RMS para facilitar la configuración del diseño.
- Identificar qué desencadenará la necesidad de retransmitir un sistema de fabricación.
- Desarrollar herramientas para respaldar la decisión de cómo y cuándo reconfigurar el sistema RMS.
- Combinar el diseño del layout con las tecnologías proporcionadas por industria 4.0.
- Desarrollar estudios sobre medidas de rendimiento para evaluar configuraciones de diseño RMS.

Y por último, el libro “*Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*” (Ayadehe et al., 2010), ya mencionado otras veces, propone la siguiente metodología de diseño:

1. Definición de requisitos de reconfigurabilidad:
 - Análisis de la tendencia en el desarrollo de productos.
 - Definir el número de variantes.
 - Definición de la estructura y salida de la variabilidad del sistema operativo,
 - Análisis del área de uso más adecuada.
2. Identificar el área de uso más adecuada.
3. Identificación de los esfuerzos necesarios:
 - Tiempo
 - Coste
4. Cuantificar el grado de reconfigurabilidad
5. Identificar las posibilidades y las limitaciones de RMS.
6. Identificar el poder y las habilidades de los módulos.
7. Prueba de disponibilidad y estado del mantenimiento.
8. Características de los módulos de máquinas reconfigurables, que se verá en los próximos apartados:
 - a. Propiedades y tareas globales según el tipo de módulo:
 - Pasivo/Activo
 - Movimientos + características de carga
 - b. Controles.
 - c. Diseño de interfaces:
 - Elementos mecánicos y propiedades
 - Geometría
 - Funciones auxiliares
 - d. Elementos eléctricos.

3.1.4. Beneficios de los sistemas de producción reconfigurables

Unos de los principales beneficios de reconfigurar un diseño, según el marco teórico estudiado, es el hecho de

que el coste de manejo de materiales se puede minimizar debido a que los equipos se pueden reconfigurar y adaptar a una nueva demanda.

A causa de la corta vida de un diseño dado y la disponibilidad de los datos de producción para un periodo determinado, es posible considerar la optimización de las medidas de rendimiento operativo, como minimizar los tiempos de ciclo parcial y los inventarios de trabajo en proceso.

El potencial de reconfigurar diseños con frecuencia, en cierto sentido, transforma un diseño de un problema estratégico, en el que solo se consideran los costes de manejos de materiales a largo plazo, en un problema táctico en el que solo se consideran medidas de rendimiento operativo además de los costes de manejo de materiales y reubicación de máquinas al cambiar de una configuración de diseño a la siguiente.

3.2. Máquinas Reconfigurables

3.2.1. ¿Qué son las máquinas reconfigurables?

Las máquinas reconfigurables, en inglés, *Reconfigurable Machine Tool* (RMT), forman el corazón de los sistemas de producción reconfigurables (Maganha, Silva and Ferreira, 2019) estudiados anteriormente, impartiendo características distintivas, tales como funcionalidades personalizadas y capacidad ajustable a través de la estructura cambiante de la máquina. Estas máquinas son capaces de realizar una variedad de operaciones según sus distintas configuraciones, y su funcionalidad puede cambiar simplemente cambiando sus módulos, pudiendo volver a su estado original o volver a cambiar de nuevo sus características para cualquier otra funcionalidad.

Los dos objetivos básicos de los RMT son (Koren *et al.*, 1999):

- Aumentar la tasa de producción de la máquina agregando dispositivos de mecanizado.
- Adaptar la funcionalidad de la máquina cambiando su geometría para adaptarse a la producción de un nuevo miembro de una familia de piezas.

Estos sistemas son económicos y robustos, ya que se adaptan a los requisitos de la producción, haciendo que el uso de los recursos se minimice y, que la flexibilidad de su diseño permita una conversión rentable cuando se planteen nuevos requisitos de producción.

3.2.2. Características de las máquinas reconfigurables

Las máquinas reconfigurables forman parte de los sistemas de producción reconfigurables, por lo que, comparten las mismas características, pero aplicadas a las máquinas:

- **Personalización ó Customización:** capacidad de aplicar flexibilidad personalizada a la máquina para cumplir nuevos requerimientos dentro de una familia de piezas.
- **Escalabilidad:** capacidad de cambiar eficientemente la tasa de producción de la máquina mediante cambio o aumento de sus componentes.
- **Convertibilidad:** capacidad de redireccionar eficientemente la funcionalidad de la máquina para cumplir nuevos requerimientos de producción.
- **Modularidad:** agrupación de funciones y equipos en unidades que pueden ser manipuladas en diferentes configuraciones de la máquina.
- **Integración:** capacidad de integrar módulos de máquinas de forma rápida y precisa mediante interfaces “mecánicos, de control y de información”.

- **Capacidad de diagnóstico:** capacidad de monitorizar el estado de la máquina y los controles para detectar y diagnosticar defectos en productos.

3.2.3. Requerimientos de las máquinas reconfigurables

Según el artículo “Reconfigurable Machine Tools” (Landers, Min y Koren, 2001), los RMT se diferencian de otros tipos de máquinas herramientas (máquinas dedicadas, máquinas CNC...) en función de cómo cumplen tres tipos de requisitos: requisitos de fabricación, requisitos de control y requisitos de mecanizado.

El primero de ellos hace referencia a los requisitos de fabricación. Los requisitos dominantes para la producción se pueden dividir en dos: los mix de productos, es decir, el conjunto de piezas a fabricar, y el volumen, es decir, la cantidad producida por unidad de tiempo de cada pieza. Una variedad de factores influirá en el cambio de los conjuntos de piezas y volúmenes a lo largo del tiempo, como, por ejemplo, el aumento y disminución de la demanda de los clientes. Estos factores pueden dar lugar a pequeñas modificaciones de diseño en las piezas de producción, la introducción de nuevas piezas, la eliminación progresiva de las piezas actuales, o el aumento y disminución en el volumen de cada parte. Otro de los requisitos de fabricación hace referencia a los requisitos de las operaciones en las máquinas, que consisten en el conjunto de características de cada operación y en su tiempo de ciclo. Los cambios en los requisitos de producción influyen directamente en los requisitos de operación. Las máquinas dedicadas se diseñan para un único producto y un volumen fijo, las máquinas CNC se diseñan para una amplia variedad de productos y un volumen fijo, mientras que las RMT se diseñan para una familia de productos y un volumen cambiante.

Por otro lado, el requisito de control de un RMT debe basarse en el concepto de arquitectura abierta, donde la arquitectura del software y el hardware es modular y se pueden agregar o eliminar fácilmente. Esto permite que el controlador se adapte a los requisitos operativos actuales, y, por lo tanto, convertirse en un sistema robusto, teniendo la capacidad de ser reconfigurado cuando los requisitos cambian o se añade una nueva tecnología.

Por último, existen los requisitos mecánicos. Para que una máquina cumpla con la productividad y la calidad demandada de una operación, debe incluir la capacidad de producir según los movimientos específicos de la pieza (capacidad de la cinemática máquina-herramienta) y satisfacer sus tolerancias. Por otro lado, para satisfacer las tolerancias hay que examinar errores geométricos del componente, errores de montaje, etc. Para entender mejor este último requerimiento, la viabilidad cinemática es un requisito que la máquina-herramienta debe poder realizar para producir un conjunto de funciones. En este caso, el RMT deberá ser mecánicamente modular para adaptarse a estos cambios. Otro de los aspectos que debe cumplir este último requisito es la rigidez estructural. Si esto no se cumple se pueden producir deflexiones que causan errores geométricos y vibraciones si las características estructurales dinámicas no tienen un diseño adecuado.

3.2.4. Planteamiento de estudio de las máquinas reconfigurables en sistemas reconfigurables

En este apartado, se llevará a cabo un breve ejemplo del comienzo de integración de un RMT en un sistema de producción reconfigurable. Para ello, se tratará el caso de estudio del artículo “Modularity assessment in reconfigurable manufacturing system (RMS) design: an Archived Multi-Objective Simulated Annealing-based approach” (Haddou Benderbal, Dahane and Benyoucef, 2018), en el cual se explican las hipótesis y requisitos que se tienen al inicio del diseño de un sistema reconfigurable.

El problema del artículo consiste en el diseño de un nuevo sistema reconfigurable en el que se seleccionan un

conjunto de módulos, de una lista de máquinas candidatas e identificadas como el conjunto de módulos necesarios para realizar una operación concreta. Cada máquina seleccionada, comprende un cierto número de módulos, donde en las librerías RMS están todos los módulos posibles que pueden configurarse a las distintas máquinas. Esta decisión, estará guiada por tres objetivos, a saber, la minimización del tiempo total, la maximización de la modularidad del sistema y la minimización del coste total del sistema.

En cuanto a las características del producto, en este caso concreto, se definen por las contenidas en el producto. Cada función a llevar a cabo, consta de una serie de operaciones y además, se deberá respetar la precedencia de cada una para poder completar todas las operaciones.

Los requisitos para el diseño de productos y la producción, tienen la capacidad de llevar a cabo la configuración requerida, ya que, cada máquina reconfigurable posee un conjunto de configuraciones específicas. Dichas configuraciones ofrecen un rango de movimiento a lo largo de los ejes cartesianos (x,y,z), el cual, representa una de las principales necesidades para asignar operaciones a las máquinas donde se identificaran los requisitos de las herramientas según la operación. Dichas configuraciones de herramientas dependen de los diferentes componentes de las máquinas, que se consideran recursos limitados que podrían compartirse entre diferentes máquinas con módulos auxiliares.

Por otro lado, es posible combinar módulos para obtener nuevas configuraciones si fuera necesario, que implica que las combinaciones se hacen entre módulos y máquinas compatibles.

Como dato final, los sistemas RMS/RMT, dan lugar a que se puedan fabricar familias de productos y también, producir otras características de productos recientemente evolucionados que no estaban presentes en la familia original, gracias a la capacidad y funcionalidad de estos sistemas.

3.3. Células de fabricación en sistemas reconfigurables

La fabricación celular, en inglés *Cellular Manufacturing* (CM), es una parte de la tecnología de grupos, en inglés *Group Technology* (GT), para diseñar sistemas de fabricación. La idea principal de esta tecnología de grupos es mejorar la productividad del sistema de fabricación mediante la agrupación de piezas y productos, con características similares, en familias formando células de producción con un grupo de diferentes máquinas y procesos. El objetivo es minimizar los costes totales de movimientos intercelular (entre células) e intracelular (dentro de la célula) (Khatamian, 2009).

Para el diseño de la célula se tienen en cuenta varios factores como la secuencia de operaciones de cada componente o pieza, la capacidad de las máquinas y la demanda de piezas. La ruta que se sigue se suele presentar en una matriz máquina-pieza-secuencia. Dado el tipo de diseño de la célula (por ejemplo, una sola fila, en forma de U, varias filas u otras configuraciones) tiene un impacto significativo en el coste de la realización de la pieza.

En la siguiente figura (Khatamian, 2009), se muestra la ruta de las piezas según sus datos de secuencia y el tipo de coste de manejo de materiales considerando la distancia entre máquinas y si el movimiento es hacia atrás o adelante. La localización muestra el lugar y la distribución de las máquinas en las células. Por ejemplo, la ubicación de las máquinas en el diseño lineal de la célula 1 es máquina 2 – máquina 5 – máquina 4, y de la célula 2 es máquina 1 – máquina 3.

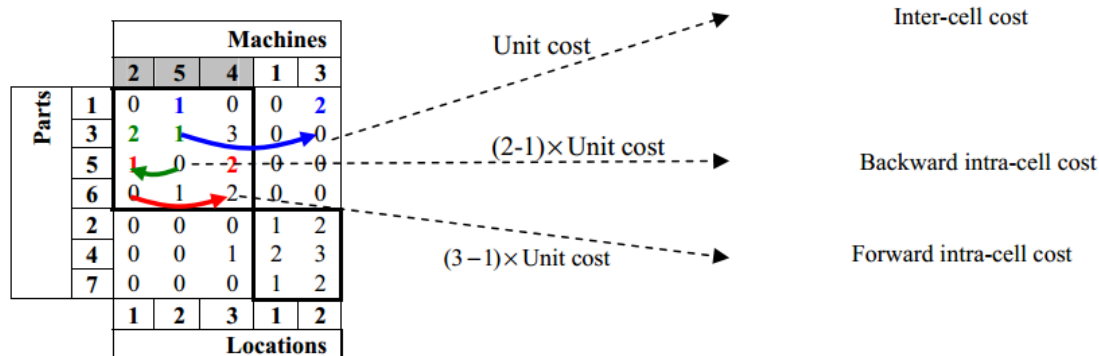


Figura 7 Gráfico de secuencia de operaciones, rutado y coste de materiales – Khatamian (2009)

En los últimos años, se han realizado numerosos intentos de integrar CMS y RMS para superar las principales deficiencias de la fabricación. El sistema de células reconfigurables, en inglés *Reconfigurable Manufacturing Cells* (RMC), en determinados artículos (Bortolini *et al.*, 2019), se trata de un conjunto de células de máquinas reconfigurables lógicamente organizadas. Esto significa que los RMC pueden cambiar durante la producción y planificar el horizonte cambiando los módulos auxiliares personalizados en el RMT.

El resultado de integrar CMS y RMS es satisfactorio, ya que, los sistemas celulares carecen de flexibilidad por sí solos y, por lo tanto, no puede responder adecuadamente a las variaciones en el diseño y la cantidad de piezas. Por sí solos, resulta difícil reubicar físicamente las instalaciones de la célula según los nuevos requisitos de producción (Pattanaik, Jain and Mehta, 2007).

Cuando una empresa decide aplicar la organización celular, se realizan tres actividades importantes (Masmoudi, Hachicha and Haddar, 2008):

- Formar células agrupando piezas en una familia y las máquinas para su realización
- Diseñar las ubicaciones de las células en la planta (movimiento intercelular)
- Diseñar las ubicaciones de las máquinas dentro de las células (movimiento intracelular)

En la práctica industrial, los ingenieros tienden a abordar un problema complejo descomponiéndolo en subproblemas e intentando proporcionar soluciones independientes para estos problemas menores. Para llevar a cabo el diseño de estas actividades, el artículo “*A New Combined Framework for the Cellular Manufacturing Systems Design*” (Bortolini *et al.*, 2019), ofrece un método eficaz que proporciona pautas para la descomposición de problemas complejos, llamado Diseño Axiomático, que define el diseño como la creación de soluciones sintetizadas en forma de productos, procesos o sistemas que satisfagan las necesidades percibidas a través del mapeo entre los requisitos funcionales y los parámetros de diseño.

Los requisitos funcionales representan los objetivos del diseño o lo que se quiere lograr y los parámetros de diseño expresan como satisfacer esos requisitos funcionales que se han marcado. Las necesidades del cliente se incluirán como requerimientos funcionales con la diferencia de que aparecerán restricciones impuestas por los clientes, que deben ser obedecidas durante todo el proceso de diseño.

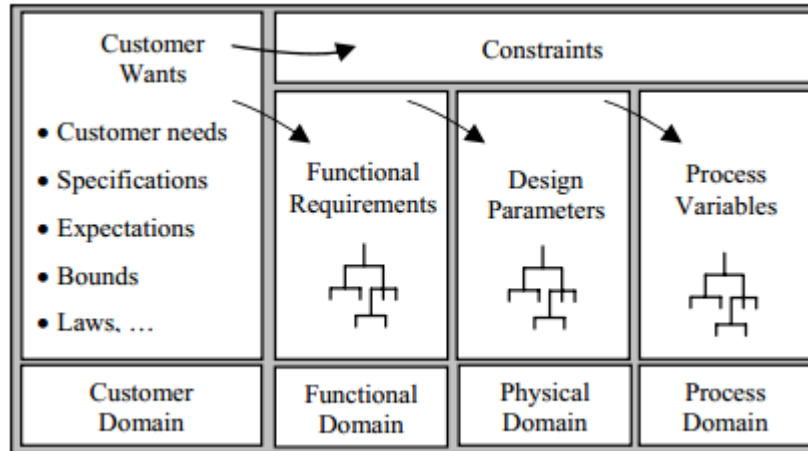


Figura 8 Gráfico proceso de diseño axiomático – Bortolini (2019).

En la ilustración anterior (Bortolini *et al.*, 2019), se pueden ver todo el conjunto de datos, comentados anteriormente, para llevar a cabo el proceso de diseño axiomático. Este método proporciona un proceso de búsqueda sistemático a través del espacio de diseño para minimizar la búsqueda aleatoria y determinar la mejor solución de diseño entre muchas alternativas, que puede ser aplicable al diseño de fabricación celular.

3.4. Ejemplo de aplicación de la distribución en planta de sistemas reconfigurables mediante modelos matemáticos

En este apartado, se llevarán a cabo el estudio de un modelo matemático que incluye la distribución en planta de sistemas reconfigurables. Este modelo se basará en un artículo científico que trata el tema a estudiar y que ayudará, posteriormente, a la elaboración de modelos para este trabajo.

El artículo (Azevedo, Crispim y Souza, 2013); formula un modelo de programación mixto-entera (MIP) basado en un modelo FLP (Flexible Layout Problem) con objetivos múltiples y áreas desiguales. Lo más interesante de este artículo es que define dos tipos de reconfiguración del sistema, cambios grandes y pequeños.

El problema consiste en encontrar la mejor organización física de instalaciones (departamentos, máquinas, estaciones de trabajo, almacenes, etc.) en una planta industrial. y el mejor flujo de productos y materiales, considerando operaciones flexibles y eficientes.

El problema se aborda mediante la combinación de dos submodelos. El primero, define la posición relativa de los departamentos dentro de la planta y, el segundo, define la posición relativa de las instalaciones (máquinas, almacenes...) dentro de los departamentos y crea los flujos necesarios para determinar el diseño final.

Los cambios “grandes” son necesarios cuando los departamentos deben trasladarse de una planta a otra o cambiar su ubicación en la misma planta, posiblemente para la llegada de nuevos proyectos.

Por otro lado, los cambios “pequeños” son más frecuentes y consisten en reconfiguraciones dentro de un departamento agregando/quitando máquinas, o redirigiendo los flujos de materiales y productos en progreso.

La siguiente figura resume lo comentado anteriormente:

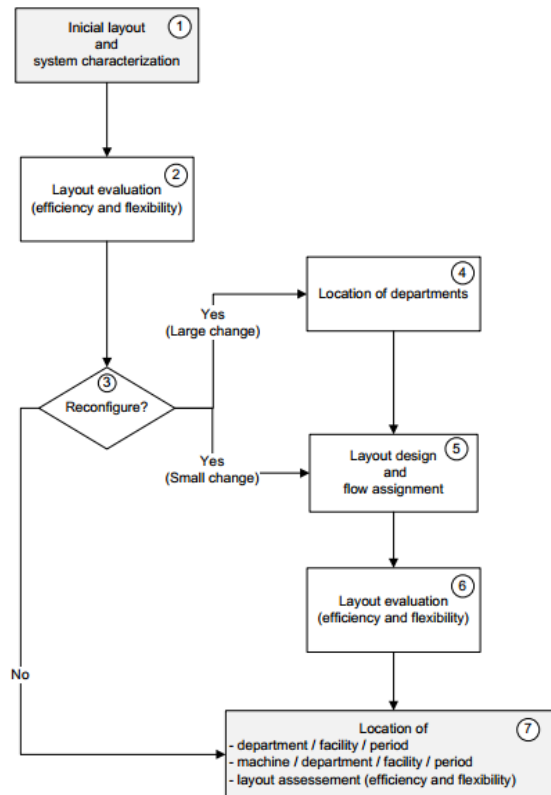


Figura 9 Decisión sobre los modelos de programación mixta-entera – Azevedo, Crispim y Souza (2013)

Se examinan diferentes escenarios:

- Centralizar los almacenes en una planta.
- Combinar departamentos del mismo tipo en la misma planta.
- Producir cada producto en una planta específica
- Permitir que todas las plantas produzcan los mismos productos.

Una vez explicado en qué consiste el problema de este artículo, se verá su modelo matemático, que consta de los siguientes supuestos generales:

- Se conoce el coste de mover máquinas, pero depende del tipo de máquina y del tipo de departamento.
- Las distancias entre ubicaciones se calculan entre los centros físicos de las ubicaciones y se mide con una norma de distribución rectilínea.
- Una máquina transforma una entrada en una salida (un producto), en realidad, también puede ser una estación de trabajo, que ensamble un producto o realice otro tipo de función.
- Todos los departamentos y máquinas se pueden mover a cualquier ubicación dentro de las planta o para otra planta.

Los índices y parámetros que comparten ambos modelos son:

- **Índices:**
 - $t = 1,2,\dots$ - periodo de tiempo
 - $f = 1,2,\dots$ - plantas
 - $i,j = 1,2,\dots$ - departamentos
 - $l,k = 1,2,\dots$ - ubicaciones en la planta o departamento
- **Parámetros:**
 - a_f : área de la planta f
 - a_i : área del departamento i

r_{lkf} : distancia entre la ubicación l y k, en la planta f

3.4.1. Distribución en planta de departamentos con reconfiguración

El modelo correspondiente a “cambios grandes” es el siguiente:

- **Parámetros adicionales:**

cr_i : coste fijo de mover el departamento i

q_{ijt} : flujo (cantidad de producto) entre el departamento i al j, en el periodo t

- **Variables de decisión:**

x_{ilft} : 1, si el departamento i está situado en la ubicación l en la planta f en el periodo t.

- **Modelo:**

$$\text{Min } C1 = \sum_t \sum_f \sum_j \sum_l \sum_k q_{itk} r_{lkf} (x_{ilft} \cdot x_{jkft}) +$$

$$\sum_t \sum_i \sum_j \sum_l \sum_k \sum_{f1} \sum_{f2} cr_i r_{if1kf2} (x_{ilf1t} \cdot x_{jkf2t+1})$$

s.a:

$$\sum_i \sum_l a_{if} x_{ilft} \leq a_f \quad \forall f \forall t \quad (1)$$

$$\sum_l x_{ilft} \leq 1 \quad \forall l \forall f \forall t \quad (2)$$

$$\sum_l x_{ilft} \leq 1 \quad \forall i \forall f \forall t \quad (3)$$

El primer término de la función objetivo se relaciona con los flujos de departamentos y plantas representando el coste de manejo de material, y el segundo término, indica el coste de reconfiguración incurrido cuando el departamento cambia su ubicación dentro de la planta.

La primera restricción (1) asegura que no se exceda el área total de una instalación. La segunda restricción (2) garantiza que un puesto en una instalación nunca tenga más de un departamento en cada periodo de tiempo. Por último, la tercera restricción (3) garantiza que un solo departamento solo se asigne a una ubicación en una planta en cada periodo de tiempo.

3.4.2. Distribución en departamentos de máquinas reconfigurables

El modelo referido a “cambios pequeños” se utiliza para respaldar el diseño en planta detallado, determinando las ubicaciones para las máquinas del departamento y asignación de los flujos, con asignación de diferentes productos a las diferentes máquinas en cada periodo.

El modelo correspondiente a “cambios pequeños” es el siguiente:

- **Índices adicionales:**

$m, n = 1, 2, \dots$ - máquinas
 $p = 1, 2, \dots$ - tipos de productos

- **Parámetros adicionales:**

cr_m : coste fijo de mover la máquina m
 cm_{mp} : capacidad de la máquina m al producir el producto p
 $q_{ij,t}$: flujo (cantidad de producto) entre la máquina m y n , en el periodo t
 r_{lki} : distancia entre la ubicación l y la ubicación k , en el departamento i
 d_{pt} : demanda del producto p , en el periodo t

- **Variables de decisión:**

y_{mlit} : 1, si la máquina m está situada en la ubicación l , en el departamento i , en el periodo t .
 u_{mpt} : 1, si la máquina m es usada para producir el producto p , en el periodo t
 b_{pmt} : cantidad del producto p , que es producido por la máquina m , en el periodo t

- **Modelo:**

$$\text{Min } C2 = \sum_t \sum_i \sum_n \sum_m \sum_l \sum_k q_{mnt} r_{lki} (y_{mlit} \cdot y_{nklit})$$

$$\sum_t \sum_{i1} \sum_{i2} \sum_k \sum_l \sum_m \sum_n cr_m r_{li1ki2} (y_{nli1t} \cdot y_{mki1t+1})$$

$$\text{Max } E = \sum_t \sum_m \sum_p \sum_i (b_{pmt} u_{mpt})$$

s.a:

$$\sum_m \sum_l a_{mi} y_{mlit} \leq a_i \quad \forall i \forall t \quad (1)$$

$$\sum_m y_{mlit} \leq 1 \quad \forall l \forall i \forall t \quad (2)$$

$$\sum_l y_{mlit} \leq 1 \quad \forall m \forall i \forall t \quad (3)$$

$$b_{pmt} \leq cm_{mp} \quad \forall t \forall p \forall m \quad (4)$$

$$\sum_f \sum_i \sum_m \sum_p (cm_p u_{mptit}) \geq \sum_p d_{pt} \quad \forall t \quad (5)$$

Este modelo consta de dos funciones objetivos: una minimiza los costes totales (C2) y otra maximiza la eficiencia (E). La primera función objetivo C2, considera un primer término que representa los costes de manejo de materiales dentro del departamento asociados al flujo entre máquinas, y un segundo término que hace referencia a los costes de reconfiguración incurridos cuando una máquina cambia su ubicación dentro de un departamento. La segunda función objetivo E, trata de aumentar el número de máquinas que se utilizan en cada periodo de tiempo.

La primera restricción (1) asegura que no se exceda el área total de un departamento.

La segunda restricción (2) garantiza que no hay superposición de máquinas en cada periodo de tiempo.

La tercera restricción (3) garantiza que una máquina solo se asigna a una ubicación en un departamento.

La cuarta restricción (4) verifica que la cantidad de producto asignado a una máquina no exceda la capacidad de la máquina.

Como última restricción (5) se garantiza que la capacidad total instalada sea suficiente para producir la demanda total.

Este ejemplo, pone de manifiesto los tipos de movimientos, costes y datos que se manejan en un problema reconfigurable y va servir como base para la definición de nuevos modelos.

4. MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA EN CÉLULAS DE FABRICACIÓN RECONFIGURABLES

Las matemáticas puras son, en su forma, la poesía de las ideas lógicas.

- Albert Einstein -

En este apartado, se mostrarán una serie de modelos creados a partir del estudio que se ha realizado anteriormente en este trabajo e incorporando aspectos específicos de los sistemas de fabricación reconfigurables y celulares. El estudio de estos modelos, se han ido elaborando de forma secuencial, es decir, los primeros modelos tratarán el problema más básico hasta llegar al último, en el que nos encontraremos con un modelo completo en el que se añaden las características de los sistemas de fabricación reconfigurables y celulares estudiados en el capítulo anterior. Se explicarán paso a paso, con nuevas hipótesis en cada uno, y siempre inspirado uno en el anterior. Por último, estos modelos están diseñados para que se puedan usar en cualquier tipo de distribución en planta con posiciones fijas, ya estén colocadas las máquinas dentro de la célula de forma lineal, en U, etc.

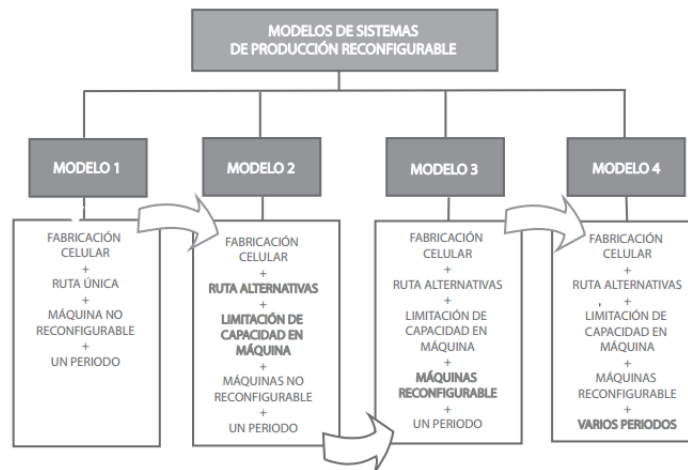


Figura 10 Modelos matemáticos para la distribución en planta en células de fabricación reconfigurables

4.1. Modelo 1

El primer problema que se abordará será el sistema de fabricación celular con número de células conocidos, localizaciones fijas para cada célula y una ruta única para la fabricación de cada tipo de pieza.

En definitiva, el resultado de este modelo, nos proporcionará una solución óptima de la distribución de las máquinas en un lugar determinado de la planta, usando células de fabricación. El modelo asignará cada máquina a una localización de una célula que minimice el coste total de los movimientos de las partes.

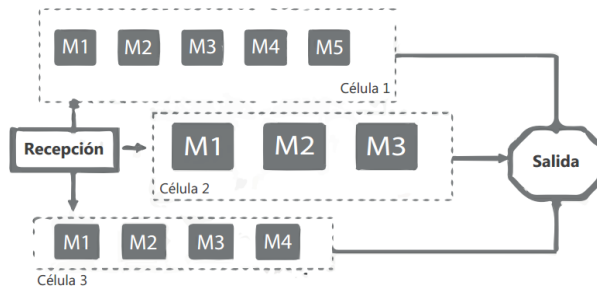


Figura 11 Gráfico células de fabricación

Se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

1. Se conocen los productos (partes a fabricar) y los recursos (máquinas) disponibles.
2. Cada parte tiene una única forma de procesarse (ruta única).
3. Se conocen las células y las posibles localizaciones o ubicaciones a situar los recursos (el número total de localizaciones es mayor o igual al de recursos a ubicar).
4. Se conoce la cantidad de partes a fabricar (demanda).
5. Se conocen los costes de desplazamiento por unidad de distancia si se hace entre células o dentro de una célula y también las distancias entre todas las localizaciones.
6. Las máquinas no son reconfigurables.
7. No hay limitaciones de tiempo para la fabricación.
8. Un solo periodo de planificación.

A continuación, se mostrará el modelo completo a resolver:

- **Índices:**
 - i: partes (i=1, ..., P)
 - k, k': máquinas (k=1, ..., M)
 - c, c': células (c=1, ..., C)
 - l(c), l'(c): localizaciones dentro de la célula c (l(c)=1, ..., L(c))
 - s(i): número de operación dentro de la única ruta de la parte i (s(i)=1, ..., S(i))
- **Parámetros:**
 - d_i: demanda de parte i (unidad/periodo).
 - C^A: coste de movimiento unitario (u.m/ u.med·ud) dentro de la célula.
 - C^E: coste de movimiento unitario (u.m/ u.med·ud) entre células.
 - D_{l(c)l'(c)}: distancia entre la localización l de la célula c y la l' de la c'.
 - a_{sik}: 1, si la operación s de la parte i requiere la máquina k en la ruta.

Es habitual usar en problemas de distribución en planta el siguiente parámetro:

f_{ikk'}: número de veces que una operación en máquina k sigue inmediatamente a otra operación en máquina k' para la parte i

El parámetro **f_{ikk'}** se calcula a partir del parámetro **a_{s(i)k}** de la siguiente forma:

$$f_{ikk'} = \sum_{s=1}^{S(i)-1} a_{s(i)k} \cdot a_{s+1(i)k'}$$

Para una mayor comprensión del dato de la matriz **a_{sik}**, se muestra un ejemplo con las rutas de 5 partes con 3 operaciones por ruta y 5 máquinas para hacer las operaciones:

Secuencia de operaciones			
Pieza	s=1	s=2	s=3
p1	M3	M2	M4
p2	M4	M1	M5
p3	M2	M3	M1
p4	M1	M3	M2
p5	M5	M2	M3

Tabla 1 Matriz secuencia de operaciones vs pieza Modelo 1

Oper1	M1	M2	M3	M4	M5	Oper2	M1	M2	M3	M4	M5	Oper3	M1	M2	M3	M4	M5
p1			1			p1		1				p1				1	
p2				1		p2	1					p2					1
p3		1				p3			1			p3	1				
p4	1					p4			1			p4		1			
p5					1	p5		1				p5			1		

Tabla 2 Matriz a_{sik} Modelo 1

Por ejemplo, la pieza 1 en la operación 1, empieza por la máquina 3. Una vez realizada la primera operación, en la siguiente, la pieza 1 requiere de la máquina 2. Y finalmente, la pieza 1 requiere la máquina 4. En este ejemplo, no hay repetición de máquinas en la misma ruta en ninguna pieza, pero podría darse ese caso.

- **Variables:**

x_{klc} : 1, si la máquina k se asigna a la localización l de la célula c.

- **Modelo:**

$$\text{Min } TV = TH^A + TH^E$$

$$TH^A = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{k'=1 \\ k \neq k'}}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} \sum_{\substack{l'=1 \\ l \neq l'}}^{L(c)} C^A d_i D_{lcl'c} f_{ikk'} x_{klc} x_{k'l'c}$$

$$TH^E = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{k'=1 \\ k \neq k'}}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} \sum_{\substack{c'=1 \\ c \neq c'}}^C \sum_{\substack{l'=1 \\ l \neq l'}}^{L(c')} C^E d_i D_{lcl'c'} f_{ikk'} x_{klc} x_{k'l'c'}$$

s.a

$$\sum_{k=1}^M x_{klc} \leq 1 \quad \forall c \forall l \quad (1)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} x_{klc} = 1 \quad \forall k \quad (2)$$

$$x_{klc} = 0,1 \quad \forall k \forall l \forall c$$

El modelo que se muestra es no lineal, cuadrático en la función objetivo (QAP). Es similar a los modelos estáticos de distribución en planta, pero incluyendo las células de fabricación.

La función objetivo consta de dos partes: el término TH^A , define el coste de movimientos que se hace de una máquina a otra dentro de una célula., mientras que el término TH^E , define el coste de movimiento que se hace

entre localizaciones de distintas células. La función objetivo, establece que la suma de ambos costes se minimice. Para ello, tiene en cuenta todos los parámetros y variables utilizadas anteriormente.

Una vez establecida la función objetivo, se dará paso a las restricciones. La primera de ellas (1), establece que en la localización de cada célula se asigna como mucho una máquina.

La segunda de las restricciones (2), establece que cada máquina se asigna a una localización de una célula.

Por último, se declaran las variables binarias del modelo.

Los modelos no lineales, suelen dar un óptimo local, aunque tarden menos en dar un resultado que el modelo linealizado. Para poder obtener la solución óptima, el modelo se ha linealizado.

Se necesitan crear nuevas variables binarias (XX) que linealizan el producto (X·X):

$XX_{klck'l'c'}$ = 1 si la máquina k se asigna a la posición l en la célula c y la máquina k' a la posición l' en célula c'. Es decir, si $x_{klc} = 1$ y $x_{k'l'c'} = 1$.

La linealización del modelo sigue los siguientes pasos:

1. Cambio de variable en la función objetivo:

$$x_{klc} \cdot x_{k'l'c'} = XX_{klck'l'c'}$$

2. Añadir las restricciones que relacionan X con XX:

$$x_{klc} + x_{k'l'c'} = 1 + XX_{klck'l'c'} \quad \forall k \forall k' \forall l \forall l' \forall c \forall c'$$

Con la linealización se puede alcanzar el óptimo, pero el número de variables crece enormemente y el tiempo de computación exponencialmente.

4.2. Modelo 2

El segundo modelo es igual que el primero, pero con la diferencia de que se añaden rutas alternativas para fabricar cada tipo de parte y hay limitaciones de capacidad en las máquinas.

El modelo, además de ubicar cada máquina en una localización de una célula, asignará la cantidad de cada parte que se fabrica usando cada ruta que minimice el coste total de los movimientos de las partes y de los tiempos de procesado.

Las hipótesis de este modelo son muy parecidas a las del anterior, con algunas diferencias:

1. Se conocen los productos (partes a fabricar) y los recursos (máquinas) disponibles.
2. **Cada parte tiene varias formas de fabricarse (rutas alternativas).**
3. Se conocen las células y las posibles localizaciones o ubicaciones a situar los recursos (el número total de localizaciones es mayor o igual al de recursos a ubicar).
4. Se conoce la cantidad de partes a fabricar (demanda).
5. Se conocen los costes de desplazamiento por unidad de distancia si se hace entre células o dentro de una célula y también las distancias entre todas las localizaciones.
6. Las máquinas no son reconfigurables.
7. **Se conocen los tiempos de procesados de cada operación, y existen limitaciones de capacidad de cada máquina (tiempo máximo disponible).**
8. Un solo periodo de planificación.

A continuación, se mostrará el modelo a resolver:

- **Índices:**
 - i:** partes ($i=1, \dots, P$)
 - k, k':** máquinas ($k=1, \dots, M$)
 - c, c':** células ($c=1, \dots, C$)
 - l(c), l'(c):** localizaciones dentro de la célula c ($l(c)=1, \dots, L(c)$)
 - r(i):** número de ruta de la parte i ($r(i)=1, \dots, R(i)$)
 - s(r,i):** número de operación dentro de la ruta r de la parte i ($s(r,i)=1, \dots, S(r,i)$)
- **Parámetros:**
 - d_i:** demanda de parte i (unidad/periodo).
 - C^A:** coste de movimiento unitario (u.m/ u.me·ud) dentro de la célula.
 - C^E:** coste de movimiento unitario (u.m/ u.me·ud) entre células.
 - D_{l(c)l'(c)}:** distancia entre la localización l de la célula c y la l' de la c'(u.me).
 - a_{srik}:** 1, si la operación s de la parte i requiere la máquina k en la ruta r.
 - P_{srik}:** tiempo de procesado de la operación s de la ruta r y parte i en la máquina k (u.t).
 - H_k:** tiempo máximo disponible (capacidad) de la máquina k.
 - C_k^P:** coste de procesado unitario (u.m/u.t) en máquina k.

Al tener limitaciones de capacidad de cada máquina, éstas se miden con tiempos, por lo que habrá que establecer unos tiempos de procesado de cada operación y los límites disponibles de cada máquina para no sobrepasarlos. Estos costes también se penalizarán en la función objetivo.

Igual que se comentó en el modelo 1, se suelen usar los parámetros de flujo:

f_{rikk'}: número de veces que una operación en máquina k sigue inmediatamente a otra operación en máquina k' para la parte i en la ruta r

El parámetro **f_{rikk'}** se calcula igual que antes, pero ahora intervienen las rutas:

$$f_{rikk'} = \sum_{s=1}^{s(r,i)-1} a_{srik} \cdot a_{s+1rik'}$$

Se va a mostrar un ejemplo para aclarar los índices y algunos parámetros. El ejemplo consta de 5 partes, 2 rutas por parte, 3 operaciones por ruta y 5 máquinas. En la figura adjunta se muestra una tabla con los datos de las rutas, indicando para cada parte, ruta y operación, la máquina que la realiza y el tiempo de operación de la misma (en horas):

		Secuencia de operaciones		
Part type (i)	Route_(r)	j=1	j=2	j=3
		1	1	3
1	2	5	4	3
2	1	1	1	1
2	2	4	1	5
3	1	2	3	1
3	2	4	3	2
4	1	1	3	2
4	2	4	5	5
5	1	2	4	3
5	2	5	2	3

Tabla 3 Matriz secuencia de operaciones vs pieza Modelo 2

En el ejemplo de la figura, la parte 1, si se fabrica con la ruta 1, usará la máquina 3 en la operación 1, la máquina 2 en la operación 2 y la máquina 4 en la operación 3. Por el contrario, si la parte 1 escoge la ruta 2, esta pasará por la máquina 5 en la operación 1, máquina 4 en la operación 2 y, por último, la máquina 3 en la operación 3. La matriz a_{srik} para el ejemplo anterior sería:

Oper1, Ruta1		M1	M2	M3	M4	M5	Oper2, Ruta 1		M1	M2	M3	M4	M5	Oper3, Ruta 1		M1	M2	M3	M4	M5
p1				1			p1		1					p1				1		
p2		1					p2	1						p2	1				1	
p3			1				p3			1				p3	1					
p4		1					p4				1			p4		1				
p5			1				p5					1		p5			1			

Oper1, Ruta2		M1	M2	M3	M4	M5	Oper2, Ruta2		M1	M2	M3	M4	M5	Oper3, Ruta2		M1	M2	M3	M4	M5
p1					0	1	p1					1		p1			1			
p2					1		p2	1						p2						1
p3					1		p3			1				p3		1				
p4					1		p4						1	p4						1
p5					0	1	p5		1					p5			1			

Tabla 4 Matriz a_{sik} Modelo 2

- **Variables**

X_{klc} : 1, si la máquina k se asigna a la localización l de la célula c

Y_{ir} : cantidad de partes i que se fabrican usando la ruta r

- **Modelo:**

$$\text{Min } TV = TH^A + TH^E + TP$$

$$TH^A = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{k'=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} \sum_{l'=1}^{L(c)} \sum_{r=1}^R C^A D_{lcl'c} f_{rikk'} Y_{ir} x_{klc} x_{k'l'c}$$

$$TH^E = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{k'=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} \sum_{c'=1}^C \sum_{l'=1}^{L(c')} \sum_{r=1}^R C^E D_{lcl'c'} f_{rikk'} Y_{ir} x_{klc} x_{k'l'c'}$$

$$TP = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} C_k^p P_{srik} Y_{ir}$$

s.a

$$\sum_{k=1}^M x_{klc} \leq 1 \quad \forall c \forall l \quad (1)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} x_{klc} = 1 \quad \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^{R(i)} Y_{ir} = d_i \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^P \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} P_{srik} Y_{ir} \leq H_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$X_{klc} = 0,1 \quad \forall k \forall l \forall c$$

$$Y_{ir} \geq 0 \quad \forall i \forall r$$

El modelo que se muestra es no lineal en la función objetivo. Este modelo estático de distribución en planta con células incluye rutas alternativas, de forma que se selecciona la fracción de la demanda de cada parte que se fabricará por cada ruta.

La función objetivo consta de tres partes: los términos TH^A y TH^E tienen el mismo significado que en el modelo anterior, mientras que el nuevo término TP, define los costes asociados a los tiempos de procesado que se usan en las diferentes operaciones para fabricar la demanda de partes. La función objetivo, establece que la suma de todos los costes se minimice. Para ello, tiene en cuenta todos los parámetros y variables utilizadas anteriormente.

Una vez establecida la función objetivo, se dará paso a las restricciones. La primera de ellas (1), igual que en el anterior modelo, establece que en cada localización de cada célula se asigna como mucho una máquina.

La segunda de las restricciones (2), igual que el anterior modelo, establece que cada máquina se asigna a una localización en una célula.

Se añade una tercera restricción (3) a este modelo con respecto a la demanda en las rutas. La demanda a fabricar de cada parte se reparte entre las rutas. Por ejemplo, si la demanda de la parte 1 es 100, 60 se puede hacer por una ruta y 40 por otra, por lo que el sumatorio de las cantidades fabricadas en cada ruta es igual a la demanda total.

La cuarta restricción (4) también es nueva en este modelo, ya que tal y como se ha definido en el modelo, se establece que hay un límite de capacidad en las máquinas. El tiempo total de procesado en cada máquina no puede superar su capacidad. Por último, se declaran las variables del modelo.

Como se ha comentado en el modelo anterior, los modelos no lineales suelen dar un óptimo local aunque tarden menos en dar un resultado que el modelo linealizado. Para poder obtener la solución óptima, el modelo se ha linealizado.

Primero, se necesitan crear dos nuevos tipos de variables: XX (binarias) y YXX (continuas):

1. Como en el modelo anterior, se necesitan crear nuevas variables binarias (XX) que linealizan el producto (X·X):

$$XX_{klck'l'c'} = 1 \text{ si la máquina } k \text{ se asigna a la posición } l \text{ en la célula } c \text{ y la máquina } k' \text{ a la posición}$$

l' en célula c'.

Se hace el cambio de variables en la función objetivo:

$$x_{klc} \cdot x_{k'l'c'} = XX_{klck'l'c'}$$

Y se añaden las restricciones que relacionan X con XX:

$$x_{klc} + x_{k'l'c'} = 1 + XX_{klck'l'c'} \quad \forall k \forall k' \forall l \forall l' \forall c \forall c'$$

- Además, se necesitan crear nuevas variables continuas (YXX) que linealizan el producto (Y·XX):

$YXX_{irkklck'l'c'}$: cantidad de la parte i fabricada usando la ruta r cuando se asigna la máquina k a la posición l en la célula c y la máquina k' a la posición l' en célula c'.

Se hace el cambio de variables en la función objetivo:

$$Y_{ir} XX_{klck'l'c'} = YXX_{irkklck'l'c'}$$

Y se añaden las restricciones que relacionan YXX con Y y con XX:

$$YXX_{irkklck'l'c'} \leq Y_{ir} + CS(1 - XX_{klck'l'c'}) \quad \forall i \forall r \forall k \forall k' \forall l \forall l' \forall c \forall c'$$

$$YXX_{irkklck'l'c'} \geq Y_{ir} - CS(1 - XX_{klck'l'c'}) \quad \forall i \forall r \forall k \forall k' \forall l \forall l' \forall c \forall c'$$

El término CS, se refiere a una cota superior.

Recordemos que con la linealización el número de variables y el tiempo de computación crecen exponencialmente.

4.3. Modelo 3

En el modelo 3, se amplía el modelo 2 incluyendo máquinas reconfigurables (RMT, Reconfigurable Machine Tool). Las máquinas convencionales se sustituyen por máquinas reconfigurables, que se componen de módulos auxiliares que dotan de funcionalidad adicional a las RMT. Con ello, se va a completar el modelo anterior con un conjunto de tipos de módulos auxiliares que se pueden añadir o quitar a cada RMT. Se va a considerar un número limitado de módulos de cada tipo en el sistema y también se define el máximo número de módulos auxiliares que pueden ir en cada RMT. Cada operación requiere de un módulo auxiliar para su ejecución.

Finalmente, cada módulo tiene una vida útil, que se traduce como el máximo de horas que puede estar el módulo en funcionamiento. En este modelo, se añade un nuevo coste al modelo anterior, que se trata del coste de cambios de módulos que se produce en una máquina. Al existir un único periodo de planificación, dicho coste ocurrirá si se añade un nuevo módulo a la máquina, es decir, será un coste de preparación de las máquinas (set-up).

El modelo, además de ubicar cada máquina en una localización de una célula, y asignar la cantidad de cada parte que se fabrica usando cada ruta, calculará el número de módulos auxiliares que se asignará a cada máquina que minimice el coste total de los movimientos de las partes, de los tiempos de procesado y de la asignación de módulos a máquinas.

Las hipótesis de este modelo son muy parecidas a las del anterior, con algunas diferencias:

- Se conocen los productos (partes a fabricar) y los recursos (máquinas) disponibles.
- Cada parte tiene varias formas de fabricarse (rutas alternativas).
- Se conocen las células y las posibles localizaciones o ubicaciones a situar los recursos (el número total de localizaciones es mayor o igual al de recursos a ubicar)

4. Se conocen la cantidad de partes a fabricar (demanda)
5. Se conocen los costes de desplazamiento por unidad de distancia si se hace entre células o dentro de una célula y también las distancias entre todas las localizaciones
6. **Las máquinas son RMT (Reconfigurable Machine Tool). Cada RMT está compuesto de módulos auxiliares. Cada operación la realiza un módulo auxiliar concreto en una RMT concreta. Existe un número limitado de módulos auxiliares. En cada RMT puede asignarse un número limitado de módulos auxiliares.**
7. Se conocen los tiempos de procesados de cada operación, y existen limitaciones de capacidad de cada máquina (tiempo máximo disponible).
8. Un solo periodo.

A continuación, se mostrará el modelo a resolver:

- **Índices:**

i : partes ($i=1, \dots, P$)

k, k' : máquinas ($k=1, \dots, M$)

c, c' : células ($c=1, \dots, C$)

$l(c), l'(c)$: localizaciones dentro de la célula c ($l(c)=1, \dots, L(c)$)

$r(i)$: número de ruta de la parte i ($r(i)=1, \dots, R(i)$)

$s(r,i)$: número de operación dentro de la ruta r de la parte i ($s(r,i)=1, \dots, S(r,i)$)

z : tipos de módulos auxiliares diferentes ($z=1, \dots, Z$)

- **Parámetros:**

d_i : demanda de parte i (unidad/periodo).

C^A : coste de movimiento unitario (u.m/ u.me·ud) dentro de la célula.

C^E : coste de movimiento unitario (u.m/ u.me·ud) entre células.

$D_{l(c)l'(c)}$: distancia entre la localización l de la célula c y la l' de la c' (u.me).

a_{srikk} : 1, si la operación s de la parte i requiere la máquina k en la ruta r .

P_{srikk} : tiempo de procesado de la operación s de la ruta r y parte i en la máquina k (u.t).

H_k : tiempo máximo disponible (capacidad) de la máquina k .

C_k^P : coste de procesado unitario (u.m/u.t) en máquina k .

MNA_k : número máximo de módulos auxiliares que puede ir en la máquina k .

TH_z : número de módulos auxiliares z disponibles.

AL_z : tiempo útil de vida de un módulo auxiliar z .

b_{sriz} : 1, si la operación s de la ruta r de la pieza i requiere el módulo z .

C_{zk}^C : coste unitario de asignar un módulo auxiliar z en la máquina k (u.m/módulo).

Igual que se comentó en el modelo anterior, se suelen usar los parámetros de flujo $f_{rikk'}$, que se calcula de igual forma que en el modelo anterior:

$f_{rikk'}$: número de veces que una operación en máquina k sigue inmediatamente a otra operación en máquina k' para la parte i en la ruta r

Se va a mostrar un ejemplo para aclarar los índices y algunos parámetros. El ejemplo consta de 5 partes, 2 rutas por parte, 3 operaciones por ruta, 5 máquinas RMT y 4 tipos de módulos auxiliares. En la figura adjunta se muestra una tabla con los datos de las rutas, indicando para cada parte, ruta y operación, la máquina que la realiza, el tiempo de operación de la misma (en horas) y el tipo de módulo auxiliar que necesita:

		Secuencia de operaciones (Machine k, Time p, Module z)		
Part type (i)	Route_(r)	s=1	s=2	s=3
		1	1	(3, 0.73, 1)
1	2	(5, 0.54, 3)	(4, 0.63, 1)	(3, 0.44, 2)
2	1	(1, 0.76, 1)	(1, 0.65, 2)	(1, 0.39, 3)
2	2	(4, 0.80, 4)	(1, 0.65, 2)	(5, 0.93, 1)
3	1	(2, 0.99, 3)	(3, 0.57, 4)	(1, 0.46, 1)
3	2	(4, 0.14, 1)	(3, 0.57, 4)	(2, 0.33, 2)
4	1	(1, 0.49, 3)	(3, 0.67, 1)	(2, 0.74, 2)
4	2	(4, 0.45, 3)	(5, 0.67, 2)	(5, 0.62, 4)
5	1	(2, 0.40, 3)	(4, 0.26, 4)	(3, 0.59, 2)
5	2	(5, 0.12, 1)	(2, 0.40, 4)	(3, 0.59, 2)

Tabla 5 Matriz secuencia de operaciones vs pieza Modelos 3 y 4

En el ejemplo de la figura, la parte 1, si se fabrica con la ruta 1, usará la máquina 3 en la operación 1 durante 0,73 horas y usando el módulo 1, la máquina 2 con 0,49 horas y el módulo 4 en la operación 2 y la máquina 4 con 0,46 horas y el módulo 3 en la operación 3. Por el contrario, si la parte 1 escoge la ruta 2, esta pasará por la máquina 5 con 0,54 horas y el módulo 3 en la operación 1, máquina 4 con 0,63 horas y el módulo 1 en la operación 2 y, por último, la máquina 3 con 0,44 horas y el módulo 2 en la operación 3.

La matriz binaria b_{sriz} es similar a la matriz a_{srilk} pero haciendo referencia a los módulos auxiliares. Los valores en el ejemplo anterior serían:

Oper1, Ruta1	M1	M2	M3	M4	M5
p1	0	0	1	0	0
p2	1	0	0	0	0
p3	0	1	0	0	0
p4	1	0	0	0	0
p5	0	1	0	0	0

Oper2, Ruta 1	M1	M2	M3	M4	M5
p1	0	1	0	0	0
p2	1	0	0	0	0
p3	0	0	1	0	0
p4	0	0	1	0	0
p5	0	0	0	1	0

Oper3, Ruta 1	M1	M2	M3	M4	M5
p1	1	0	0	0	0
p2	0	0	0	0	0
p3	0	1	0	0	0
p4	0	1	0	0	0
p5	0	0	1	0	0

Oper1, Ruta2	M1	M2	M3	M4	M5
p1	0	0	0	0	1
p2	0	0	0	1	0
p3	0	0	0	1	0
p4	0	0	0	1	0
p5	0	0	0	0	1

Oper2, Ruta2	M1	M2	M3	M4	M5
p1	0	0	0	1	0
p2	1	0	0	0	0
p3	0	0	1	0	0
p4	0	0	0	0	1
p5	0	1	0	0	0

Oper3, Ruta2	M1	M2	M3	M4	M5
p1	0	0	1	0	0
p2	0	0	0	0	1
p3	0	1	0	0	0
p4	0	0	0	0	1
p5	0	0	1	0	0

Tabla 6 Matriz a_{sik} Modelo 3 y 4

- **Variables**

X_{klc} : 1, si la máquina k se asigna a la localización l de la célula c.

Y_{ir} : cantidad de partes i que se fabrican usando la ruta r.

W_{zk} : número de módulos auxiliares z que se asignan a la máquina k (es un número entero).

- **Modelo:**

$$\text{Min } TV = TH^A + TH^E + TP + TM$$

$$TH^A = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{k'=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} \sum_{l'=1}^{L(c)} \sum_{r=1}^R C^A D_{lcl'c} f_{rikkl'} Y_{ir} x_{klc} x_{k'l'c}$$

$$TH^E = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{k'=1 \\ k \neq k'}}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} \sum_{\substack{c'=1 \\ c \neq c'}}^C \sum_{l'=1}^{L(c')} \sum_{r=1}^R C^E D_{lcl'c'} f_{rikk'} Y_{ir} x_{klc} x_{k'l'c'}$$

$$TP = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} C_k^p P_{srik} Y_{ir}$$

$$TM = \sum_{k=1}^M \sum_{z=1}^Z C_{zk}^c W_{zk}$$

s.a

$$\sum_{k=1}^M x_{klc} \leq 1 \quad \forall c \forall l \quad (1)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} x_{klc} = 1 \quad \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^{R(i)} Y_{ir} = d_i \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^P \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} P_{srik} Y_{ir} \leq H_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^M W_{zk} \leq TA_k \quad \forall z \quad (5)$$

$$\sum_{z=1}^Z W_{zk} \leq MNA_k \quad \forall k \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^P \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} P_{srik} b_{sriz} Y_{ir} \leq AL_z W_{zk} \quad \forall k \forall z \quad (7)$$

$$x_{klc} = 0,1 \quad \forall k \forall l \forall c$$

$$Y_{ir} \geq 0 \quad \forall i \forall r$$

$$W_{zk} \text{ (entero)} \quad \forall k \forall z$$

El modelo que se muestra es no lineal en la función objetivo. Este modelo estático de distribución en planta con células incluye rutas alternativas, máquinas reconfigurables (RMT) de forma que se seleccionan los módulos auxiliares que irán en cada RMT.

La función objetivo consta de cuatro partes: los términos TH^A , TH^E y TP tienen el mismo significado que en el

modelo anterior, mientras que el nuevo término TM, define los costes totales de asignar los módulos auxiliares a todas las máquinas. La función objetivo, establece que la suma de todos los costes se minimice. Para ello, tiene en cuenta todos los parámetros y variables utilizadas anteriormente.

Una vez establecida la función objetivo, se dará paso a las restricciones. La primera de ellas (1), igual que en el anterior modelo, establece que en cada localización de cada célula se asigna como mucho una máquina.

La segunda de las restricciones (2), igual que el anterior modelo, establece que cada máquina se asigna a una localización en una célula.

La tercera restricción (3), igual que el anterior modelo, reparte la demanda entre las rutas de cada parte.

La cuarta restricción (4), igual que el anterior modelo, establece que el tiempo total de procesado en cada máquina no puede superar su capacidad.

La restricción (5) es nueva en este modelo. Indica que el número de módulos auxiliares de cada tipo que se asignan a todas las máquinas, tiene que ser menor que el número de módulos auxiliares disponibles de cada tipo.

La restricción (6) también es nueva, e indica que el número de módulos auxiliares que se asignan a cada máquina, tiene que ser menor que el número máximo de módulos auxiliares que pueden ir en la máquina.

Cómo última restricción nueva (7), se fija el número de módulos mínimos de cada tipo necesarios en cada máquina en función de la vida útil de cada uno de ellos y de los tiempos de procesado de cada operación. Dichos valores se miden en unidades de tiempo (en nuestro caso en horas).

Por último, se declaran las variables del modelo.

Este modelo es no lineal en los mismos términos de la función objetivo que el modelo anterior. Si se desea obtener la solución óptima el modelo se debe linealizar. Esta linealización, se realiza igual que en el modelo anterior.

4.4. Modelo 4

El modelo 4 amplía el modelo 3 incluyendo varios periodos de planificación, es decir, repetir el modelo 3 varias veces seguidas con distintas demandas en cada periodo y permitiendo fabricar más de la demanda generando stock o inventario de cada producto al final del periodo. Como datos adicionales, se amplían los valores de la demanda de cada parte en cada periodo. Se añaden nuevos costes: los costes de inventarios (de las partes al final de cada periodo), los costes de reconfiguración de las máquinas (cambiar de localización de una máquina de un periodo a otro) y los costes de cambio de módulo (añadir o quitar un módulo de una máquina de un periodo a otro). Se mantiene el coste de setup en el primer periodo de módulos y se añade el de las máquinas (este último es un coste fijo porque se usan siempre todas las máquinas, pero podrían no serlo si alguna máquina no se localiza en algún periodo).

Como resultado del modelo, se ubicará cada máquina en una localización de una célula en cada periodo, se asignará la cantidad de cada parte que se fabricará usando cada ruta en cada periodo, y se calculará el número de módulos auxiliares que se asignará a cada máquina en cada periodo de forma que se minimice el coste total de los movimientos de las partes, de los tiempos de procesado, de la reconfiguración de máquinas y módulos de un periodo a otro y los de inventario de partes al final de los periodos.

Las hipótesis de este modelo son muy parecidas a las del anterior, con algunas diferencias:

1. Se conocen los productos (partes a fabricar) y los recursos (máquinas) disponibles.
2. Cada parte tiene varias formas de fabricarse (rutas alternativas).
3. Se conocen las células y las posibles localizaciones o ubicaciones a situar los recursos (el número total de localizaciones es mayor o igual al de recursos a ubicar)

4. Se conocen la cantidad de partes a fabricar (demanda)
5. Se conocen los costes de desplazamiento por unidad de distancia si se hace entre células o dentro de una célula y también las distancias entre todas las localizaciones
6. Las máquinas son RMT (Reconfigurable Machine Tool). Cada RMT está compuesto de módulos auxiliares. Cada operación la realiza un módulo auxiliar concreto en una RMT concreta. Existe un número limitado de módulos auxiliares. En cada RMT puede asignarse un número limitado de módulos auxiliares.
7. Se conocen los tiempos de procesados de cada operación, y existen limitaciones de capacidad de cada máquina (tiempo máximo disponible).
8. **Existen varios periodos de planificación. En cada periodo hay una demanda distinta de las partes a fabricar, y se puede cambiar de un periodo a otro:**
 - **La localización de las máquinas reconfigurables (RMT).**
 - **Los módulos auxiliares a asignar a cada RMT.**

Se añaden costes de:

- **Recolocación de una máquina de un periodo a otro.**
- **Mantenimiento de stock de piezas fabricadas de un periodo a otro.**
- **Cambio de módulo de máquina de un periodo a otro.**

A continuación, se mostrará el modelo a resolver:

- **Índices:**

i : partes ($i=1, \dots, P$)

k, k' : máquinas ($k=1, \dots, M$)

c, c' : células ($c=1, \dots, C$)

$l(c), l'(c)$: localizaciones dentro de la célula c ($l(c)=1, \dots, L(c)$)

$r(i)$: número de ruta de la parte i ($r(i)=1, \dots, R(i)$)

$s(r,i)$: número de operación dentro de la ruta r de la parte i ($s(r,i)=1, \dots, S(r,i)$)

z : tipos de módulos auxiliares diferentes ($z=1, \dots, Z$)

t : periodos de planificación ($t=1, \dots, T$)

- **Parámetros:**

d_i : demanda de parte i (unidad/periodo).

C^A : coste de movimiento unitario (u.m/ u.me·ud) dentro de la célula.

C^E : coste de movimiento unitario (u.m/ u.me·ud) entre células.

$D_{l(c)c'}$: distancia entre la localización l de la célula c y la l' de la c' (u.me).

$a_{sr ik}$: 1, si la operación s de la parte i requiere la máquina k en la ruta r .

$P_{sr ik}$: tiempo de procesado de la operación s de la ruta r y parte i en la máquina k (u.t).

H_k : tiempo máximo disponible (capacidad) de la máquina k .

C_k^P : coste de procesado unitario (u.m/u.t) en máquina k .

MNA_k : número máximo de módulos auxiliares que puede ir en la máquina k .

TH_z : número de módulos auxiliares z disponibles.

AL_z : tiempo útil de vida de un módulo auxiliar z .

$b_{sr iz}$: 1, si la operación s de la ruta r de la pieza i requiere el módulo z .

C_{zk}^C : coste unitario de asignar un módulo auxiliar z en la máquina k (u.m/módulo).

C_t^H : coste de inventario unitario al final del periodo t (u.m/ud periodo).

C_k^R : coste de recolocación de la máquina k de un periodo a otro (u.m/recolocación).

Igual que se comentó en el modelo anterior, se suelen usar los parámetros de flujo $f_{rikk'}$, que se calcula de igual forma que en los modelos 2 y 3:

$f_{rikk'}$: número de veces que una operación en máquina k sigue inmediatamente a otra operación en máquina k' para la parte i en la ruta r

- **Variables:**

X_{klct} : 1, si la máquina k se asigna a la localización l de la célula c en el periodo t

Y_{irt} : cantidad de partes i que se fabrican usando la ruta r en el periodo t

W_{zkt} : número de módulos auxiliares z que se asignan a la máquina k (es un número entero) en el periodo t

I_{it} : cantidad de partes i que se almacenan al final del periodo t .

- **Modelo:**

$$\text{Min } TV = TH^A + TH^E + TP + TM + TR + TI$$

$$TH^A = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{k'=1 \\ k \neq k'}}^M \sum_{c=1}^C \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq l'}}^{L(c)} \sum_{\substack{l'=1 \\ l \neq l'}}^{L(c)} \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T C^A D_{lcl'c} f_{rikk'} Y_{irt} x_{klct} x_{k'l'ct}$$

$$TH^E = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{k'=1 \\ k \neq k'}}^M \sum_{c=1}^C \sum_{\substack{l=1 \\ c \neq c'}}^{L(c)} \sum_{\substack{l'=1 \\ l \neq l'}}^{L(c')} \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T C^E D_{lcl'c} f_{rikk'} Y_{irt} x_{klct} x_{k'l'ct}$$

$$TP = \sum_{i=1}^P \sum_{k=1}^M \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} \sum_{t=1}^T C_k^p P_{srik} Y_{irt}$$

$$TM = \sum_{k=1}^M \sum_{z=1}^z C_{zk}^c W_{zk1} + \sum_{t=2}^T \sum_{k=1}^M \sum_{z=1}^z C_{zk}^c |W_{zkt} - W_{zk(t-1)}|$$

$$TR = \sum_{k=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} C_k^R x_{klc1} + \frac{1}{2} \sum_{t=2}^T \sum_{k=1}^M \sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} C_k^R |x_{klct} - x_{klc(t-1)}|$$

$$TI = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^P C_t^H I_{it}$$

s.a

$$\sum_{k=1}^M x_{klct} \leq 1 \quad \forall c \forall l \forall t \quad (1)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{l=1}^{L(c)} x_{klct} = 1 \quad \forall k \forall t \quad (2)$$

$$I_{it} = \sum_{t'=1}^T \sum_{r=1}^{R(i)} Y_{irt'} - \sum_{t'=1}^t d_{it'} \quad \forall i \forall t [I_{iT} = 0] \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^P \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} P_{srik} b_{sriz} Y_{ir} \leq H_{kt} \quad \forall k \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^M W_{zkt} \leq TA_{kt} \quad \forall z \forall t \quad (5)$$

$$\sum_{z=1}^Z W_{zkt} \leq MNA_k \quad \forall k \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^P \sum_{r=1}^{R(i)} \sum_{s=1}^{S(r,i)} P_{srik} b_{sriz} Y_{irt} \leq AL_z W_{zkt} \quad k \forall z \forall t \quad (7)$$

$$X_{klct} = 0,1 \quad \forall k \forall l \forall c \forall t$$

$$Y_{irt} \geq 0 \quad \forall i \forall r \forall t$$

$$W_{zkt} \text{ (entero)} \quad \forall k \forall z \forall t$$

$$I_{it} \geq 0 \quad \forall i \forall t$$

El modelo que se muestra es no lineal en la función objetivo. Este modelo dinámico de distribución en planta con células incluye rutas alternativas, máquinas reconfigurables (RMT) y varios periodos de planificación, de forma que se seleccionan los módulos auxiliares que irán en cada RMT para cada periodo y los inventarios de partes que se generan al final de cada periodo.

La función objetivo consta de seis partes: los términos TH^A , TH^E y TP tienen el mismo significado que en el modelo anterior, mientras que el término TM , sufre modificaciones pues define los costes totales de asignar los módulos auxiliares a todas las máquinas en el primer periodo, y también define los costes de quitar y poner módulos a las máquinas (reconfiguración de módulos) en los siguientes periodos según la cantidad a fabricar. Se añade un quinto término TR asociado al coste total de relocalización de las máquinas RMT de un periodo a otro (reconfiguración de máquinas), es decir, los costes de asignación de las máquinas a su localización en el primer periodo y el coste de recolocación de las máquinas en los siguientes periodos. El coeficiente $\frac{1}{2}$ significa que la máquina no se quita, sino que se recoloca. El último término TI define el coste total de inventario de piezas.

La función objetivo, establece que la suma de todos los costes se minimice. Para ello, tiene en cuenta todos los parámetros y variables utilizadas anteriormente.

Una vez establecida la función objetivo, se dará paso a las restricciones. En este modelo, algunas de las restricciones establecidas en modelos anteriores serán modificadas al añadir varios periodos al modelo:

- (1) En cada localización l de cada célula c se asigna como mucho una máquina para cada periodo t .
- (2) Cada máquina k se asigna a una localización en cada periodo t .
- (3) La demanda de cada pieza i en cada periodo t se satisface con la cantidad fabricada entre el periodo actual y los anteriores; la cantidad sobrante se almacena al final del periodo.
- (4) No se puede superar la capacidad de cada máquina k en cada periodo t .

- (5) No se puede superar el número de módulos auxiliares disponibles de cada tipo z en cada periodo t.
- (6) En cada máquina k, no se puede superar en cada periodo t el número máximo de módulos auxiliares que se puede instalar.
- (7) El número de módulos auxiliares de cada tipo z a instalar en cada máquina k depende de la vida útil de cada módulo auxiliar y debe superar los tiempos de procesados requeridos.

Por último, se declaran las variables del modelo.

Como se ha comentado en los modelos anteriores, los modelos no lineales suelen dar un óptimo local aunque tarden menos en dar un resultado que el modelo linealizado. Para poder obtener la solución óptima, el modelo se ha linealizado.

Existen 4 tipos de no linealidades en el modelo:

1. No linealidad cuadrática debido al producto de variables binarias (X·X):

Como en los modelos anteriores, se necesitan crear nuevas variables binarias (XX) que linealizan el producto (X·X):

$$XX_{klck'l'c't} = 1 \text{ si la máquina } k \text{ se asigna a la posición } l \text{ en la célula } c \text{ y la máquina } k' \text{ a la posición } l' \text{ en célula } c'.$$

Se hace el cambio de variables en la función objetivo:

$$x_{klc} \cdot x_{k'l'c'} = XX_{klck'l'c't}$$

Y se añaden las restricciones que relacionan X con XX:

$$x_{klc} + x_{k'l'c'} = 1 + XX_{klck'l'c't} \quad \forall k \forall k' \forall l \forall l' \forall c \forall c'$$

2. No linealidad debido al producto de variables continuas y binarias (Y·XX):

Como en los modelos anteriores, se necesitan crear nuevas variables continuas (YXX) que linealizan el producto (Y·XX):

$$YXX_{irkklck'l'c't}: \text{ cantidad de la parte } i \text{ fabricada usando la ruta } r \text{ en el periodo } t \text{ cuando se asigna la máquina } k \text{ a la posición } l \text{ en la célula } c \text{ y la máquina } k' \text{ a la posición } l' \text{ en célula } c'.$$

Se hace el cambio de variables en la función objetivo:

$$Y_{irt} \cdot XX_{klck'l'c't} = YXX_{irkklck'l'c't}$$

Y se añaden las restricciones que relacionan YXX con Y y con XX:

$$YXX_{irkklck'l'c't} \leq Y_{irt} + CS(1 - XX_{klck'l'c't}) \quad \forall i \forall r \forall k \forall k' \forall l \forall l' \forall c \forall c' \forall t$$

$$YXX_{irkklck'l'c't} \geq Y_{irt} - CS(1 - XX_{klck'l'c't}) \quad \forall i \forall r \forall k \forall k' \forall l \forall l' \forall c \forall c' \forall t$$

El término CS, se refiere a una cota superior.

3. No linealidad debido a los valores absolutos de variables binarias (|X·X|):

Se necesitan crear nuevas variables binarias (XB, XD) que linealizan el valor absoluto de variables binarias (|X-X|):

$XB_{klct}=1$ si la máquina k se asigna a la localización l de la célula c en el periodo t y no estaba asignada a esa localización en el periodo (t-1)

$XD_{klct-1}=1$ si la máquina k se asignó a la localización l de la célula c en el periodo (t-1) y no se asigna a esa localización en el periodo t

Se hace el cambio de variables en la función objetivo:

$$|X_{klct} - X_{klc(t-1)}| = XB_{klct} + XD_{klc(t-1)}$$

Y se añaden las restricciones que relacionan X con XB y XD:

$$X_{klct} - X_{klc(t-1)} = XB_{klct} - XD_{klc(t-1)} \quad \forall k \forall c \forall l \forall t > 2$$

$$XB_{klct} = 0,1 ; XD_{klct} = 0,1 \quad \forall k \forall c \forall l \forall t$$

4. No linealidad debido a los valores absolutos de variables enteras (|W-W|):

Se necesitan crear nuevas variables enteras (WB, WD) que linealizan el valor absoluto de variables enteras (|W-W|):

WB_{zkt} : número de módulos auxiliares z que se asignan a la máquina k en el periodo t y no estaban asignados en el periodo (t-1)

WD_{zkt-1} : número de módulos auxiliares z que se asignaron a la máquina k en el periodo (t-1) y no se asignan en el periodo t

Se hace el cambio de variables en la función objetivo:

$$|W_{zkt} - W_{zk(t-1)}| = WB_{zkt} + WD_{zk(t-1)}$$

Y se añaden las restricciones que relacionan W con WB y WD:

$$W_{zkt} - W_{zk(t-1)} = WB_{zkt} - WD_{zk(t-1)} \quad \forall k \forall z \forall t > 2$$

$$WB_{zkt} = integer ; WD_{zkt} = integer \quad \forall z \forall k \forall t$$

Recordemos que con la linealización el número de variables y el tiempo de computación crecen exponencialmente.

5. EXPERIMENTACIÓN

La ciencia es la progresiva aproximación del hombre al mundo real.
- Max Planck -

Una vez analizados los modelos matemáticos para el problema de la distribución en planta de células de fabricación con máquinas reconfigurables del capítulo anterior, se abordará la experimentación de los mismos. En este capítulo se analizarán una serie de casos, con diferentes escenarios en cada caso, en los que se analizará el comportamiento de cada uno de los modelos expuestos para cada escenario. Con ello, se analizarán los resultados obtenidos y se podrán establecer conclusiones.

5.1. Introducción

Para abordar la experimentación de los modelos, se usará el software LINGO, herramienta integral diseñada para hacer que la construcción y resolución de modelos de optimización lineal, no lineal (convexos y no convexos), cuadráticos, cuadráticamente restringidos, de segundo orden de cono, semidefinidos, estocásticos y enteros sean más rápidos, fáciles y eficientes. LINGO proporciona un paquete completamente integrado que incluye un lenguaje poderoso para expresar modelos de optimización, un entorno con todas las funciones para crear y editar problemas y un conjunto de solucionadores rápidos integrados. En este caso, se usa la versión 9.0.

En total, se experimentarán sobre los ocho modelos matemáticos expuestos en el apartado anterior (cuatro lineales y cuatro no lineales). Estos problemas se resolverán gracias al Global Solver de LINGO, el cual combina una serie de procedimientos de acotación y técnicas de reducción/simplificación del rango del modelo dentro de un método Branch-and-bound para encontrar óptimos globales.

5.2. Casos de prueba

En este punto, se explicará cada uno de los casos que se resolverán en LINGO a través de los modelos expuestos en el capítulo anterior. En cada uno de los casos se detallará el número de máquinas, partes, rutas, operaciones y demás elementos aplicables según modelo, generando diversos escenarios de experimentación.

Indicar que gran parte de la información de los casos de prueba ha sido extraída del artículo de Kia et al. (2013): partes, máquinas, rutas, operaciones y tiempos. Los datos nuevos asociados a máquinas reconfigurables (módulos auxiliares, costes) y células (ubicaciones, distancias) han sido generados para este trabajo.

5.2.1. Caso 1

El caso 1 presentará un planteamiento más elemental en el que el número de máquinas, células, ubicaciones o partes, será menor y resoluble óptimamente para un número reducido de periodos.

Este primer caso, consta de 3 partes, 2 rutas por parte, 3 operaciones por ruta, 5 máquinas reconfigurables y 4 tipos de módulos auxiliares disponibles. Por otro lado, encontraremos 2 células con 3 posiciones en cada una de ellas.

5.2.1.1. Caso 1 en Modelo 4

El modelo 4, como se ha definido anteriormente, asigna cada máquina a una localización de una célula en cada

periodo, se asigna la cantidad de cada parte que se fabrica usando una o varias rutas en cada periodo, y se calcula el número de módulos auxiliares que se asigna a cada máquina en cada periodo de forma que se minimice el coste total de los movimientos de las partes, de los tiempos de procesado, de la reconfiguración de máquinas y módulos de un periodo a otro y de inventario de partes al final de los periodos.

A continuación, se describirá la información necesaria para la definición y ejecución del escenario:

a) Ruta de cada pieza:

En este primer paquete de información, se muestra una tabla con los datos de cada ruta para cada parte:

- ✓ Ruta y operación,
- ✓ La máquina que la realiza,
- ✓ El tiempo de operación de la misma (medidos en horas) y
- ✓ El tipo de módulo auxiliar que se necesita.

Todos estos datos quedan reflejados en la siguiente tabla:

		Secuencia de operaciones (Máquina k, Tiempo p, Módulo z)		
Parte (i)	Ruta (r)	s=1	s=2	s=3
1	1	(2, 0.99, 3)	(3, 0.57, 4)	(1, 0.46, 1)
1	2	(4, 0.14, 1)	(3, 0.57, 4)	(2, 0.33, 2)
2	1	(1, 0.49, 3)	(3, 0.67, 1)	(2, 0.74, 2)
2	2	(4, 0.45, 3)	(5, 0.67, 2)	(5, 0.62, 4)
3	1	(2, 0.40, 3)	(4, 0.26, 4)	(3, 0.59, 2)
3	2	(5, 0.12, 1)	(2, 0.40, 4)	(3, 0.59, 2)

Tabla 7 Secuencia de operaciones Modelos 3 y 4 en Caso I

Como ejemplo, la parte 1, si se fabrica con la ruta 1, usará la máquina 2 en la operación 1 durante 0,99 horas usando el módulo 3.

b) Matriz de distancias

Otro de los datos importantes, es la matriz de distancias. En esta matriz, se incluye la distancia entre ubicaciones de una misma célula (intracelular) y entre ubicaciones de distintas células (intercelular).

Las distancias se calculan siguiendo los ejes x e y. Por ejemplo, para moverse de la posición 1.1 a la 2.3, una de las opciones, sería desplazarse verticalmente hasta la célula 2 (40 u.d.) para posteriormente calcular el movimiento horizontal (2 u.d. +2 u.d. = 4 u.d.) hasta llega a la posición 2.3.

Dicho cálculo de distancias ortogonales, lo podemos ver en el siguiente gráfico:

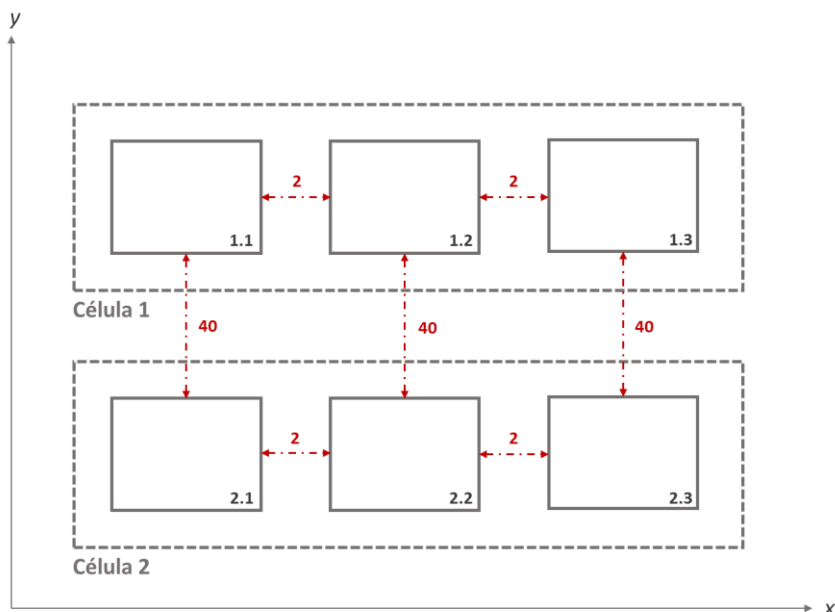


Figura 12 Gráfico de distancias Caso I

Este cálculo da como resultado la siguiente tabla (medidos en u.d.):

cs	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
1.1	0	2	4	40	42	44
1.2	2	0	2	42	40	42
1.3	4	2	0	44	42	40
2.1	40	42	44	0	2	4
2.2	42	40	42	2	0	2
2.3	44	42	40	4	2	0

Tabla 8 Matriz de distancias Caso I

c) Demanda

Las demandas de partes a entregar a los clientes establecida para cada uno de los tres periodos (medidas en u.f.) son:

t	Demanda (d_{it})		
	1	2	3
1	200	250	300
2	0	250	200
3	400	350	150

Tabla 9 Demandas Caso I (3 periodos)

d) Costes

Los costes unitarios de los movimientos entre ubicaciones de una misma célula y entre células (medidos en u.m./u.f.:u.d.) son:

C^A : Coste intra-celular	10
C^E : Coste inter-celular	25

Tabla 10 Costes intracelulares / intercelular Caso I

Los costes unitarios de procesado de cada máquina (k) (medidos en u.m./hora·u.f.) son:

k	1	2	3	4	5
C^p_k	8	7	5	6	7

Tabla 11 Costes unitarios de procesado de cada máquina Caso I

Los costes de reconfiguración o cambio de tipo de módulo (z) en cada máquina (k) (medidos en u.m./cambio):

C^c_{zk}	k	1	2	3	4	5
z	1	160	160	160	160	160
	2	180	180	180	180	180
	3	200	200	200	200	200
	4	220	220	220	220	220

Tabla 12 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso I

Los costes unitarios de mantenimiento del inventario que queda al final de cada periodo (t) (medidos en u.m./u.f.) son:

t	1	2	3
C^h_t	5	5	5

Tabla 13 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso I

Los costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas (k) de un periodo a otro (t) (medidos en u.m./cambio) son:

k (t)	1	2	3	4	5
C^r_k	900	1100	1000	800	1200

Tabla 14 Costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas Caso I

e) Limitaciones del modelo

Número máximo de módulos auxiliares (z) que pueden ir en cada máquina (k):

k (t)	1	2	3	4	5
MNA_k	4	4	4	4	4

Tabla 15 Número máximo de módulos auxiliares (z) que pueden ir en cada máquina Caso I

Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar (z) (medido en horas):

z (t)	1	2	3	4
AL_z	300	300	300	300

Tabla 16 Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar Caso I

Capacidad (tiempo máximo disponible) de la máquina (k) según el periodo (t) (medido en horas):

H_{kt}	t	1	2	3
----------	---	---	---	---

k	1	700	700	700
	2	700	700	700
	3	700	700	700
	4	700	700	700
	5	700	700	700

Tabla 17 Capacidad de la máquina Caso I

Número de módulos auxiliares (z) disponibles según el periodo (t):

TA _{zt}	t	1	2	3
z	1	4	4	4
	2	4	4	4
	3	4	4	4
	4	4	4	4

Tabla 18 Número de módulos auxiliares Caso I

Hay que indicar que para el Modelo 4 de este Caso 1 se han ejecutado 3 escenarios para cada modelo (lineal y no lineal):

- **Escenario con 3 periodos:** la información es la mostrada anteriormente.
- **Escenario con 2 periodos:** se modifica la siguiente información:
 - o Tabla de demandas:

	Demanda (d _{it})	
t	1	2
1	200	250
2	0	250

Tabla 19 Demandas Caso I (dos periodos)

- o Costes unitarios de mantenimiento del inventario:

t	1	2
C ^H _t	5	5

Tabla 20 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso I (dos periodos)

- o Capacidad de las máquinas:

H _{kt}	t	1	2
k	1	700	700
	2	700	700
	3	700	700
	4	700	700
	5	700	700

Tabla 21 Capacidad de las máquinas Caso I (dos periodos)

- o Número de módulos auxiliares disponibles:

TA _{zt}	t	1	2	3
z	1	4	4	4
	2	4	4	4
	3	4	4	4
	4	4	4	4

Tabla 22 Número de módulos auxiliares disponibles (tres periodos)

- **Escenario con 1 periodo:** se modifica la siguiente información:

- Tabla de demandas:

		Demanda (d _{it})
t	1	
1	250	
2	250	
3	350	

Tabla 23 Demandas Caso I (un periodo)

- Costes unitarios de mantenimiento del inventario:

t	1
C ^H _t	5

Tabla 24 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso I (un periodo)

- Capacidad de las máquinas:

H _{kt}	t	1
k	1	700
	2	700
	3	700
	4	700
	5	700

Tabla 25 Capacidad de las máquinas del primer periodo Caso I (un periodo)

- Número de módulos auxiliares disponibles:

TA _{zt}	t	1
z	1	4
	2	4
	3	4
	4	4

Tabla 26 Número de módulos auxiliares disponibles Caso I (un periodo)

5.2.1.2. Caso 1 en Modelo 3

El modelo 3, como se ha definido anteriormente, a diferencia del modelo 4, no considera múltiples periodos y por

tanto tampoco incluye los costes de inventario ni los costes de reconfiguración entre periodos (por cambio de módulos o por recolocación de máquinas reconfigurables). Se mantienen los costes de preparación de módulos en el primer periodo.

Por tanto, la información de este escenario coincide con la del Escenario de 1 periodo del modelo 4, excepto que no se incluye información sobre:

- Los costes unitarios de mantenimiento del inventario
- Los costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas

5.2.1.3. Caso 1 en Modelo 2

El modelo 2, como se ha definido anteriormente, a diferencia del modelo 3, no considera que las máquinas sean reconfigurables, por lo que desaparece el concepto de módulos auxiliares.

Por tanto, la información de este escenario coincide con la del Escenario del modelo 3, excepto que no se incluye información sobre:

- Los costes de reconfiguración o cambio de tipo de módulo
- Número máximo de módulos auxiliares
- Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar
- Número de módulos auxiliares disponibles

Además, en la información de las rutas desaparece el módulo auxiliar utilizado en cada operación:

		Secuencia de operaciones (Máquina k, Tiempo p)		
Parte (i)	Ruta (r)	s=1	s=2	s=3
1	1	(2, 0.99)	(3, 0.57)	(1, 0.46)
1	2	(4, 0.14)	(3, 0.57)	(2, 0.33)
2	1	(1, 0.49)	(3, 0.67)	(2, 0.74)
2	2	(4, 0.45)	(5, 0.67)	(5, 0.62)
3	1	(2, 0.40)	(4, 0.26)	(3, 0.59)
3	2	(5, 0.12)	(2, 0.40)	(3, 0.59)

Tabla 27 Secuencia de operaciones modelo 2 Caso I

5.2.1.4. Caso 1 en Modelo 1

El modelo 1, como se ha definido anteriormente, a diferencia del modelo 2, no considera que las partes tengan rutas alternativas ni que haya limitaciones de tiempos en las máquinas. Se centra pues en el modelo de distribución en planta estático con células de fabricación.

Por tanto, la información de este escenario coincide con la del Escenario del modelo 2, excepto que no se incluye información sobre:

- Capacidad (tiempo máximo disponible) de la máquina

Además, en la información de las rutas desaparece una de las rutas de cada parte y también los tiempos en cada máquina. A continuación, se muestra la ruta elegida:

		Secuencia de operaciones (Máquina k)		
Parte (i)	Ruta (r)	s=1	s=2	s=3
1	2	(4)	(3)	(2)

2	2	(4)	(5)	(5)
3	1	(2)	(4)	(3)

Tabla 28 Secuencia de operaciones modelo 1 Caso I

5.2.2. Caso 2

El caso 2 es una ampliación del caso 1, con la diferencia de que aparecen dos nuevas partes, es decir, habrá 5 partes. Las dos nuevas partes corresponderán a la parte 1 y 2, con sus rutas, y las restantes (3,4 y 5) serán las 3 partes correspondientes al modelo anterior. Otra de las diferencias será la de una nueva ubicación en cada célula, lo que llevará a un cambio en la matriz de distancias.

5.2.2.1. Caso 2 en Modelo 4

El modelo 4, como se ha definido anteriormente, asigna cada máquina a una localización de una célula en cada periodo, se asigna la cantidad de cada parte que se fabrica usando una o varias rutas en cada periodo, y se calcula el número de módulos auxiliares que se asigna a cada máquina en cada periodo de forma que se minimice el coste total de los movimientos de las partes, de los tiempos de procesado, de la reconfiguración de máquinas y módulos de un periodo a otro y de inventario de partes al final de los periodos.

A continuación, se describirá la información necesaria para la definición y ejecución del escenario:

a) Ruta de cada pieza:

En este primer paquete de información, se muestra una tabla con los datos de cada ruta para cada parte:

- ✓ Ruta y operación,
- ✓ La máquina que la realiza,
- ✓ El tiempo de operación de la misma (medidos en horas) y
- ✓ El tipo de módulo auxiliar que se necesita.

Todos estos datos quedan reflejados en la siguiente tabla:

		Secuencia de operaciones (Máquina k, Tiempo p, Módulo z)		
Parte (i)	Ruta (r)	s=1	s=2	s=3
1	1	(3, 0.73, 1)	(2, 0.49, 4)	(4, 0.46, 3)
1	2	(5, 0.54, 3)	(4, 0.63, 1)	(3, 0.44, 2)
2	1	(1, 0.76, 1)	(1, 0.65, 2)	(1, 0.39, 3)
2	2	(4, 0.80, 4)	(1, 0.65, 2)	(5, 0.93, 1)
3	1	(2, 0.99, 3)	(3, 0.57, 4)	(1, 0.46, 1)
3	2	(4, 0.14, 1)	(3, 0.57, 4)	(2, 0.33, 2)
4	1	(1, 0.49, 3)	(3, 0.67, 1)	(2, 0.74, 2)
4	2	(4, 0.45, 3)	(5, 0.67, 2)	(5, 0.62, 4)
5	1	(2, 0.40, 3)	(4, 0.26, 4)	(3, 0.59, 2)
5	2	(5, 0.12, 1)	(2, 0.40, 4)	(3, 0.59, 2)

Tabla 29 Secuencia de operaciones modelos 2 y 4 Caso II

b) Matriz de distancias

La matriz de distancias se calcula del mismo modo que el caso anterior, pero teniendo en cuenta que ahora

hay cuatro ubicaciones en vez de tres. En esta matriz, se incluye la distancia entre ubicaciones de una misma célula (intracelular) y entre ubicaciones de distintas células (intercelular).

Dicho cálculo de distancias ortogonales, lo podemos ver en el siguiente gráfico:

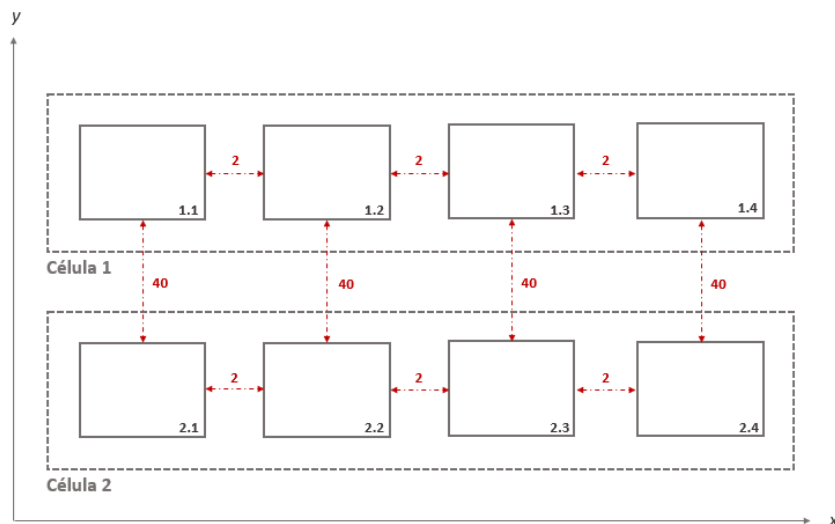


Figura 13 Gráfico de distancias Caso II

Este cálculo da como resultado la siguiente tabla (medidos en u.d.):

cs	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4
1.1	0	2	4	6	40	42	44	46
1.2	2	0	2	4	42	40	42	44
1.3	4	2	0	2	44	42	40	42
1.4	6	4	2	0	46	44	42	40
2.1	40	42	44	46	0	2	4	6
2.2	42	40	42	44	2	0	2	4
2.3	44	42	40	42	4	2	0	2
2.4	46	44	42	40	6	4	2	0

Tabla 30 Matriz de distancias Caso II

c) Demanda

Las demandas de partes a entregar a los clientes establecida para cada uno de los tres periodos (medidas en u.f.) son:

dit	t	1	2	3
i	1	300	400	200
	2	350	150	0
	3	200	250	300
	4	0	250	200
	5	400	350	150

Tabla 31 Demanda Caso II (tres periodos)

d) Costes

Los costes unitarios de los movimientos entre ubicaciones de una misma célula y entre células (medidos en

u.m./u.f.:u.d.) son:

C^A : Coste intra-celular	10
C^E : Coste inter-celular	25

Tabla 32 Costes intracelulares / intercelular Caso II

Los costes unitarios de procesamiento de cada máquina (k) (medidos en u.m./hora:u.f.) son:

k	1	2	3	4	5
C^P_k	8	7	5	6	7

Tabla 33 Costes unitarios de procesamiento de cada máquina Caso II

Los costes de reconfiguración o cambio de tipo de módulo (z) en cada máquina (k) (medidos en u.m./cambio):

C^C_{zk}	k	1	2	3	4	5
z	1	160	160	160	160	160
	2	180	180	180	180	180
	3	200	200	200	200	200
	4	220	220	220	220	220

Tabla 34 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso II

Los costes unitarios de mantenimiento del inventario que queda al final de cada periodo (t) (medidos en u.m./u.f.) son:

t	1	2	3
C^H_t	5	5	5

Tabla 35 Costes unitarios de reconfiguración o cambio de tipo de módulo Caso II

Los costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas (k) de un periodo a otro (t) (medidos en u.m./cambio) son:

k (t)	1	2	3	4	5
C^R_k	900	1100	1000	800	1200

Tabla 36 Costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas Caso II

e) Limitaciones del modelo

Número máximo de módulos auxiliares (z) que pueden ir en cada máquina (k):

k (t)	1	2	3	4	5
MNA_k	4	4	4	4	4

Tabla 37 Número máximo de módulos auxiliares (z) que pueden ir en cada máquina Caso II

Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar (z) (medido en horas):

z (t)	1	2	3	4
AL_z	300	300	300	300

Tabla 38 Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar Caso II

Capacidad (tiempo máximo disponible) de la máquina (k) según el periodo (t) (medido en horas):

H_{kt}	t	1	2	3
k	1	700	700	700
	2	700	700	700
	3	700	700	700
	4	700	700	700
	5	700	700	700

Tabla 39 Capacidad de la máquina Caso II

Número de módulos auxiliares (z) disponibles según el periodo (t):

TA_{zt}	t	1	2	3
z	1	4	4	4
	2	4	4	4
	3	4	4	4
	4	4	4	4

Tabla 40 Número de módulos auxiliares (z)

Hay que indicar que para el Modelo 4 de este Caso 1 se han ejecutado 3 escenarios para cada modelo (lineal y no lineal):

- **Escenario con 3 periodos:** la información es la mostrada anteriormente.
- **Escenario con 2 periodos:** se modifica la siguiente información:

- o Tabla de demandas:

t	Demanda (d_{it})	
	1	2
1	200	250
2	0	250
3	400	350

Tabla 41 Demanda Caso II (dos periodos)

- o Costes unitarios de mantenimiento del inventario:

t	1	2
C^H_t	5	5

Tabla 42 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso II

- o Capacidad de las máquinas:

H_{kt}	t	1	2
k	1	700	700
	2	700	700
	3	700	700
	4	700	700
	5	700	700

Tabla 43 Capacidad de las máquinas Caso II

- Número de módulos auxiliares disponibles:

TA_{zt}	t	1	2
z	1	4	4
	2	4	4
	3	4	4
	4	4	4

Tabla 44 Número de módulos auxiliares disponibles

- **Escenario con 1 periodo:** se modifica la siguiente información:

- Tabla de demandas:

	Demanda (d_{it})
t	1
1	250
2	250
3	350

Tabla 45 Demandas Caso II (un periodo)

- Costes unitarios de mantenimiento del inventario:

t	1
C^H_t	5

Tabla 46 Costes unitarios de mantenimiento de inventario Caso II

- Capacidad de las máquinas:

H_{kt}	t	1
k	1	700
	2	700
	3	700
	4	700
	5	700

Tabla 47 Capacidad de las máquinas Caso II (un periodo)

- Número de módulos auxiliares disponibles:

TA_{zt}	t	1
z	1	4
	2	4
	3	4
	4	4

Tabla 48 Número de módulos auxiliares disponibles Caso II (un periodo)

5.2.2.2. Caso 2 en Modelo 3

El modelo 3, como se ha definido anteriormente, a diferencia del modelo 4, no considera múltiples periodos y por tanto tampoco incluye los costes de inventario ni los costes de reconfiguración entre periodos (por cambio de

módulos o por recolocación de máquinas reconfigurables). Se mantienen los costes de preparación de módulos en el primer periodo.

Por tanto, la información de este escenario coincide con la del Escenario de 1 periodo del modelo 4, excepto que no se incluye información sobre:

- Los costes unitarios de mantenimiento del inventario
- Los costes de reconfiguración o recolocación de las máquinas

5.2.2.3. Caso 2 en Modelo 2

El modelo 2, como se ha definido anteriormente, a diferencia del modelo 3, no considera que las máquinas sean reconfigurables, por lo que desaparece el concepto de módulos auxiliares.

Por tanto, la información de este escenario coincide con la del Escenario del modelo 3, excepto que no se incluye información sobre:

- Los costes de reconfiguración o cambio de tipo de módulo
- Número máximo de módulos auxiliares
- Tiempo de vida útil de cada tipo de módulo auxiliar
- Número de módulos auxiliares disponibles

Además, en la información de las rutas desaparece el módulo auxiliar utilizado en cada operación:

		Secuencia de operaciones (Máquina k, Tiempo p)		
Parte (i)	Ruta (r)	s=1	s=2	s=3
1	1	(3, 0.73)	(2, 0.49)	(4, 0.46)
1	2	(5, 0.54)	(4, 0.63)	(3, 0.44)
2	1	(1, 0.76)	(1, 0.65)	(1, 0.39)
2	2	(4, 0.80)	(1, 0.65)	(5, 0.93)
3	1	(2, 0.99)	(3, 0.57)	(1, 0.46)
3	2	(4, 0.14)	(3, 0.57)	(2, 0.33)
4	1	(1, 0.49)	(3, 0.67)	(2, 0.74)
4	2	(4, 0.45)	(5, 0.67)	(5, 0.62)
5	1	(2, 0.40)	(4, 0.26)	(3, 0.59)
5	2	(5, 0.12)	(2, 0.40)	(3, 0.59)

Tabla 49 Secuencia de operaciones modelo 2 Caso II

5.2.2.4. Caso 2 en Modelo 1

El modelo 1, como se ha definido anteriormente, a diferencia del modelo 2, no considera que las partes tengan rutas alternativas ni que haya limitaciones de tiempos en las máquinas. Se centra pues en el modelo de distribución en planta estático con células de fabricación.

Por tanto, la información de este escenario coincide con la del Escenario del modelo 2, excepto que no se incluye información sobre:

- Capacidad (tiempo máximo disponible) de la máquina

Además, en la información de las rutas desaparece una de las rutas de cada parte y también los tiempos en cada máquina. A continuación, se muestra la ruta elegida:

		Secuencia de operaciones Machine k		
Parte (i)	Ruta (r)	s=1	s=2	s=3
1	2	5	4	3
2	1	1	1	1
3	2	4	3	2
4	2	4	5	5
5	1	2	4	3

Tabla 50 Secuencia de operaciones modelo 1 Caso II

5.3. Resultados casos de prueba

A través del software LINGO, se han resuelto los escenarios citados. Hay que hacer notar que en algunos de los escenarios no se ha llegado a alcanzar el valor óptimo y se ha interrumpido la ejecución del escenario. A continuación, se presentarán los resultados obtenidos, comparaciones entre diferentes modelos y las conclusiones de cada uno de ellos.

A modo de resumen, los escenarios que se analizarán son:

Caso 1 / Caso 2
Modelo 1 - NL
Modelo 1 - L
Modelo 2 - NL
Modelo 2 - L
Modelo 3 - NL
Modelo 3 - L
Modelo 4 - NL (1 periodo)
Modelo 4 - L (1 periodo)
Modelo 4 - NL (2 periodo)
Modelo 4 - L (2 periodo)
Modelo 4 - NL (3 periodo)
Modelo 4 - L (3 periodo)

Tabla 51 Modelos a ejecutar

5.3.1. Resultados Caso 1

En este apartado, se irán mostrando los resultados obtenidos de cada modelo. Posteriormente, se harán comparativas de modelos y se presentarán datos conjuntos.

5.3.1.1. Modelo 1

El modelo 1 asigna las 5 máquinas a las ubicaciones repartidas entre las 2 células, es decir, en un total de 6 ubicaciones posibles. Para tener un resultado visual, se presentará un gráfico, en donde se rellenará las ubicaciones en donde se ha asignado cada máquina.

En ambos escenarios, la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global.

- **No Lineal:**

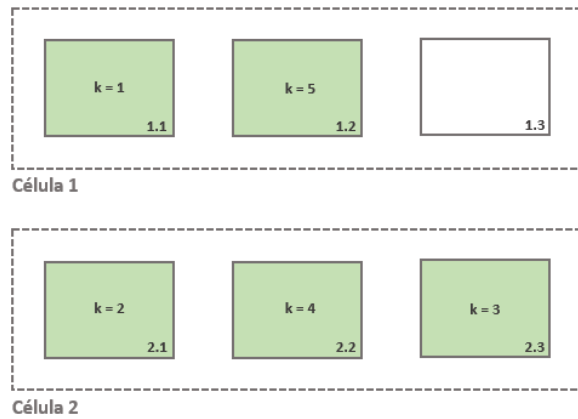


Figura 14 Distribución en planta modelo 1 (no lineal) Caso I

- **Lineal:**

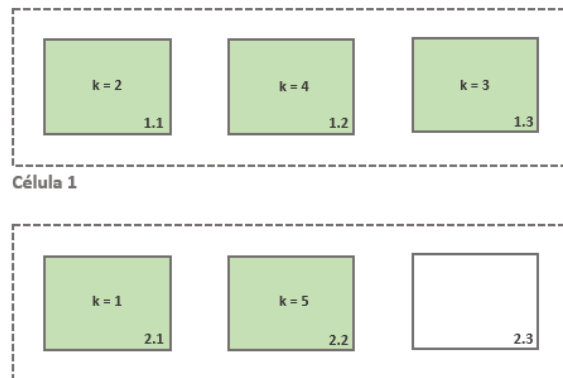


Figura 15 Distribución en planta modelo 1 (lineal) Caso I

El coste coincide en cada uno de los modelos (medidos en u.m):

THA	THE	TOTAL
29000	250000	279000

Tabla 52 Función objetivo (costes) modelo 1 Caso I

Este resultado tendría sentido, ya que ambos modelos (no lineal / lineal) generan la misma asignación de máquinas intercambiando las células, pero los movimientos intercelulares e intracelulares son los mismos.

5.3.1.2. Modelo 2

En el modelo 2, a parte de las asignaciones de máquinas, también se muestran las cantidades de piezas que se fabrican según la ruta en la que se hayan realizado.

En ambos escenarios, la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global.

- **No Lineal:**

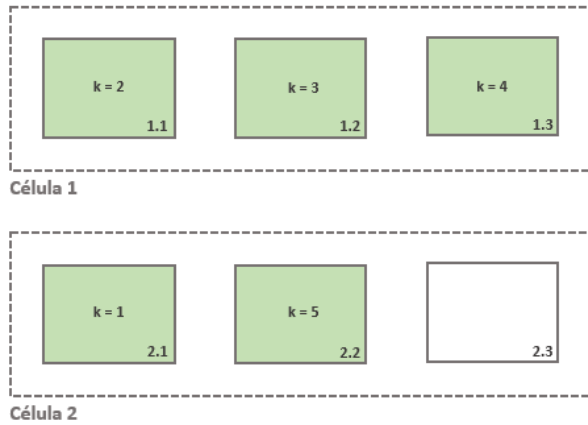


Figura 16 Distribución en planta modelo 2 (no lineal) Caso I

El coste total del modelo no lineal:

THA	THE	TP	TOTAL
31000	262500	6991	300491

Tabla 53 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I

- **Lineal:**

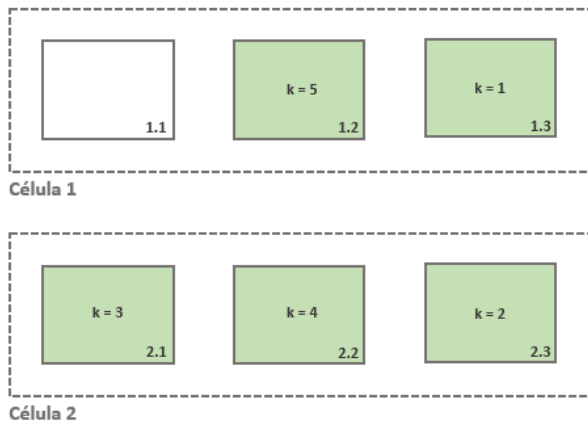


Figura 17 Distribución en planta modelo 2 (lineal) Caso I

El coste total del modelo lineal:

THA	THE	TP	TOTAL
29000	250000	6991	285991

Tabla 54 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I

Las piezas fabricadas coinciden en ambos modelos:

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250

3	1	350
	2	0

Tabla 55 Piezas fabricadas modelo 1 Caso I

Comparando ambos modelos:

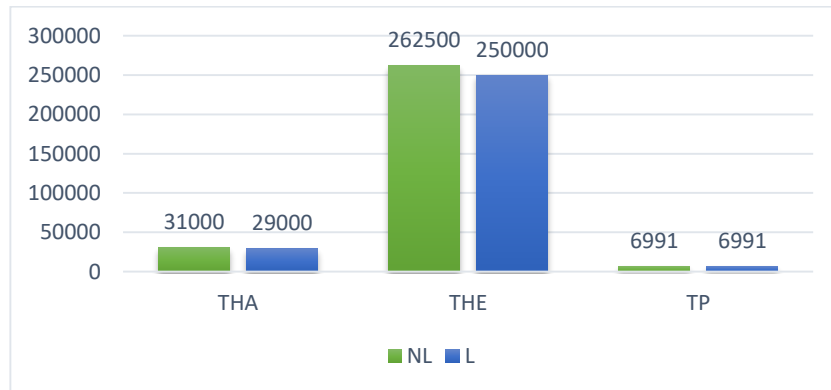


Figura 18 Diagrama comparación modelo 2 (lineal y no lineal) Caso I

El modelo que lleva a la solución óptima global de mínimo coste es el lineal, mientras que el no lineal se ha quedado en un óptimo local. Se comprueba que para realizar las operaciones, la solución del modelo lineal recorre menos distancia intracelular e intercelular, según reflejan los costes. Esto lo podemos comparar con la tabla de operaciones:

Parte (i)	Ruta (r)	Secuencia de operaciones Machine k		
		s=1	s=2	s=3
1	2	5	4	3
2	1	1	1	1
3	2	4	3	2
4	2	4	5	5
5	1	2	4	3

Tabla 56 Secuencia de operaciones modelo 2 Caso I

Según las piezas fabricadas, las piezas están asignadas a las siguientes rutas:

Pieza	Ruta
1	2
2	2
3	1

Tabla 57 Ruta vs Pieza Caso I

Si atendemos a la secuencia de operaciones, según los modelos:

- La pieza 1 en la ruta 2 sigue la siguiente secuencia 4>3 >2, tanto con el modelo lineal como en el modelo no lineal solo se realizan movimientos intracelulares. El modelo no lineal, en este caso, realiza menos recorrido.
- La pieza 2 en la ruta 2 sigue la siguiente secuencia 4>5>5, tanto el modelo lineal como el no lineal, realizan un movimiento intercelular, pero en el no lineal se recorre ortogonalmente intercelular + intracelular, por lo tanto, castiga más al modelo y hace el coste se eleve.
- Por último, la pieza 3 en la ruta 1, la secuencia es 2>4>3 que es un caso similar a la secuencia de la pieza 1.

Por otro lado, los costes del tiempo de procesado son los mismos ya que el tiempo de procesado es el mismo en cada modelo.

5.3.1.3. Modelo 3

Los resultados del modelo 3, se estudiarán de forma parecida al modelo 2.

En ambos escenarios, la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global.

- No Lineal:**

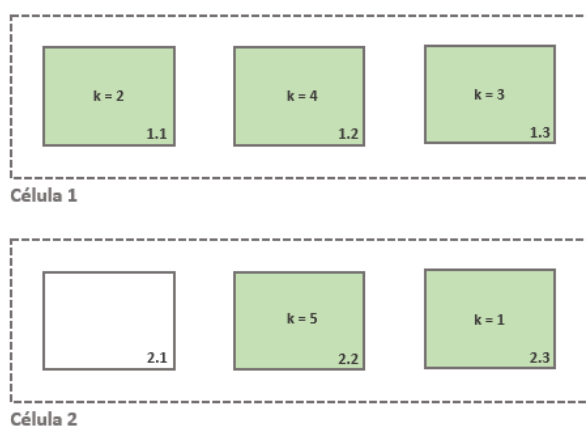


Figura 19 Distribución en planta modelo 3 (no lineal) Caso I

El coste total del modelo no lineal:

THA	THE	TP	TM	TOTAL
29000	250000	6991	1760	287751

Tabla 58 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I

- Lineal:**

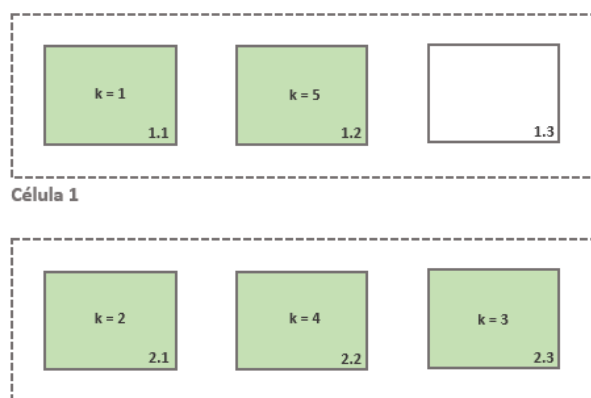


Figura 20 Distribución en planta modelo 3 (lineal) Caso I

El coste total del modelo lineal:

THA	THE	TP	TM	TOTAL
29000	250000	6991	1760	287751

Tabla 59 Función objetivo (costes) modelo 2 Caso I

Las piezas fabricadas coinciden en ambos modelos, es el mismo que en el anterior modelo:

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250
3	1	350
	2	0

Tabla 60 Piezas fabricadas en los modelos Caso I

Los resultados de los costes tienen sentido que sean iguales, ya que las posiciones son las mismas, pero intercambiando las células. Según la secuencia de operaciones, ambos modelos recorren los mismos movimientos intracelulares e intercelulares.

Los costes de cambio de módulos son los mismos debido a que el número de módulos usados es el mismo en cada uno de los modelos.

5.3.1.4. Modelo 4

Este modelo consta de 3 escenarios posibles, como se ha comentado en capítulos anteriores. Los posibles escenarios son:

- ✓ Modelo 4, no lineal, 1 periodo
- ✓ Modelo 4, lineal, 1 periodo
- ✓ Modelo 4, no lineal, 2 periodo
- ✓ Modelo 4, lineal, 2 periodo
- ✓ Modelo 4, no lineal, 3 periodo
- ✓ Modelo 4, lineal, 3 periodo

En los 3 escenarios no lineales y en el escenario lineal de 1 periodo la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global. Pero en los escenarios lineales de 2 y 3 periodos, la ejecución se ha interrumpido a las 4 horas y la solución es "feasible" sin garantía de optimalidad.

A continuación, se mostrarán las asignaciones máquina-célula-posición obtenidas:

- **No Lineal:**
 - **1 periodo:**

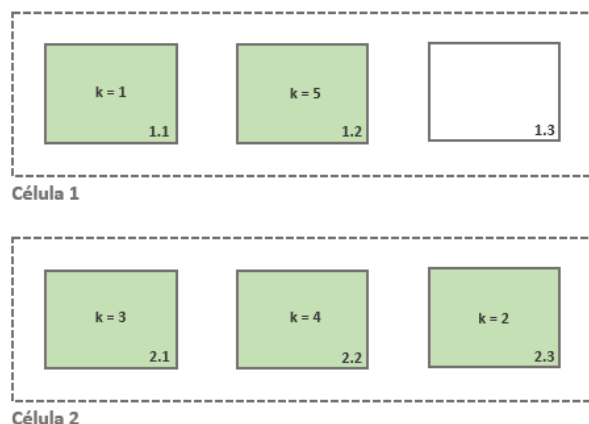


Figura 21 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso I (un periodo)

- 2 periodos:

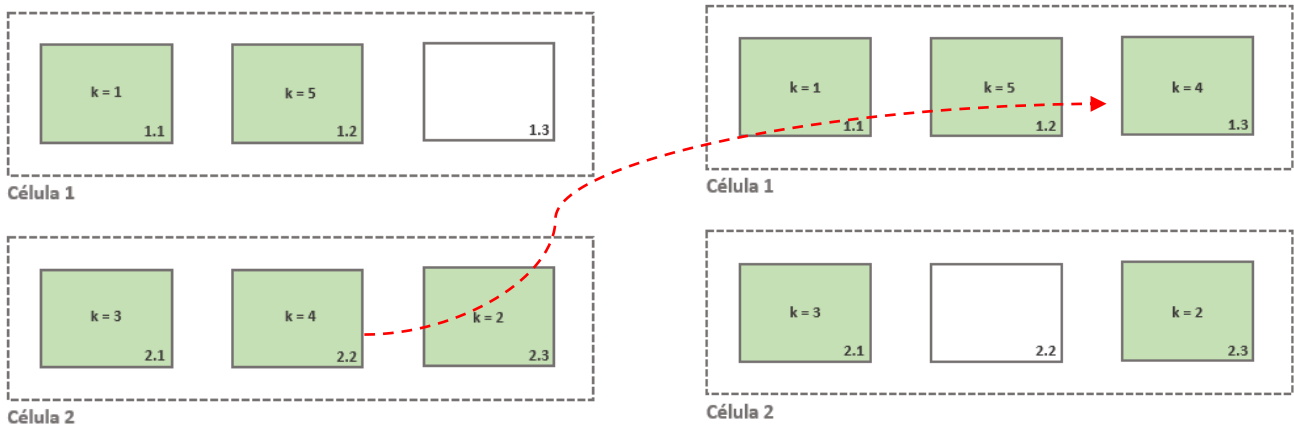


Figura 22 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso I (dos periodos)

- 3 periodos:

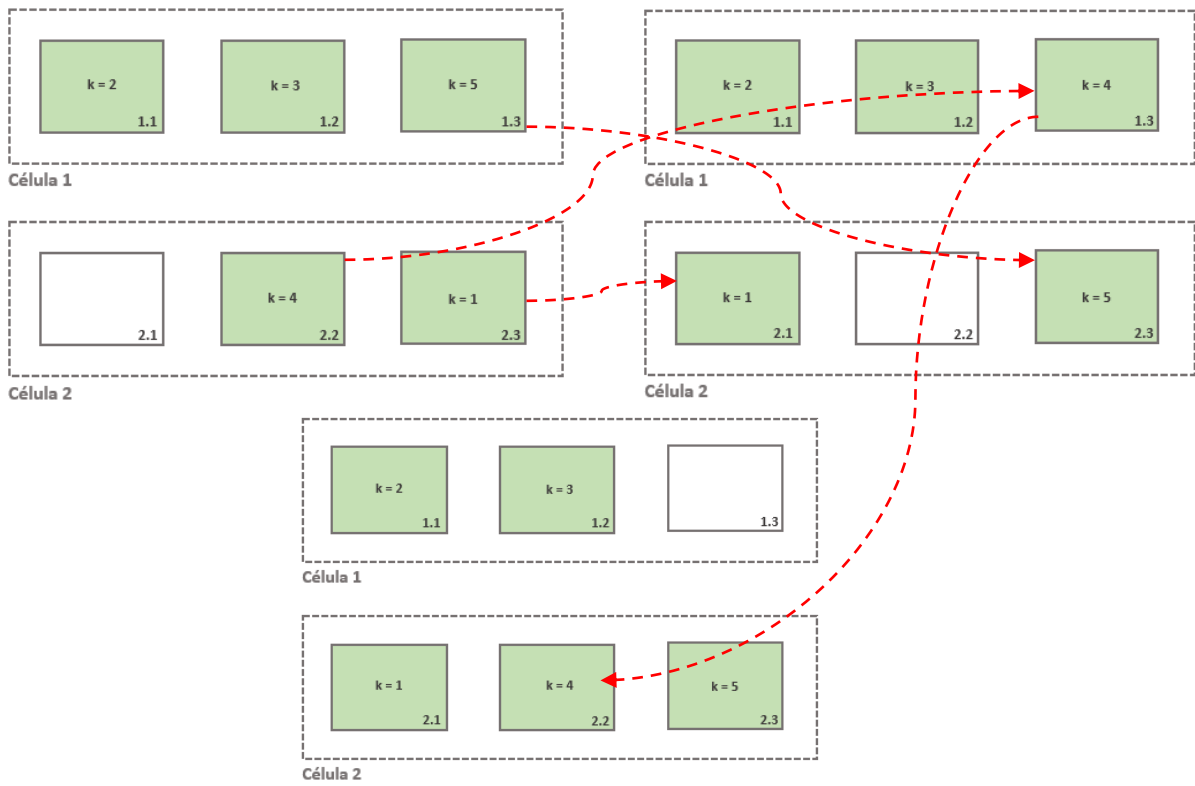


Figura 23 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso I (tres periodos)

- Lineal:

- 1 periodo

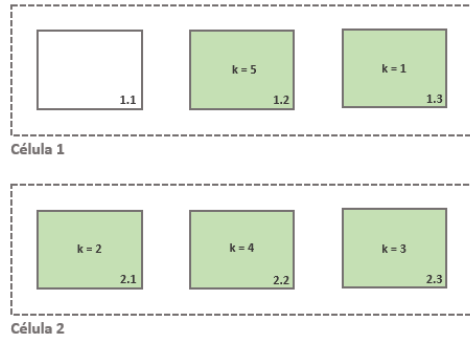


Figura 24 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso I (un periodo)

○ 2 periodo

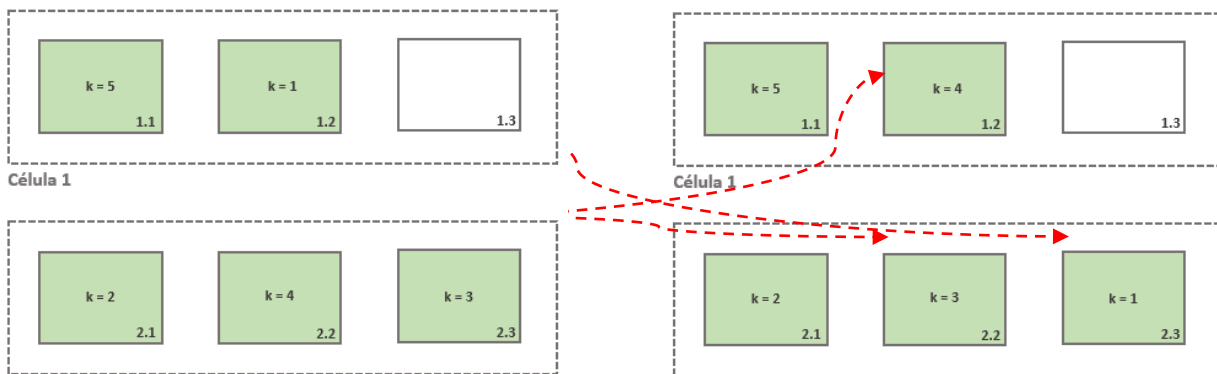


Figura 25 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso I (dos periodos)

○ 3 periodos

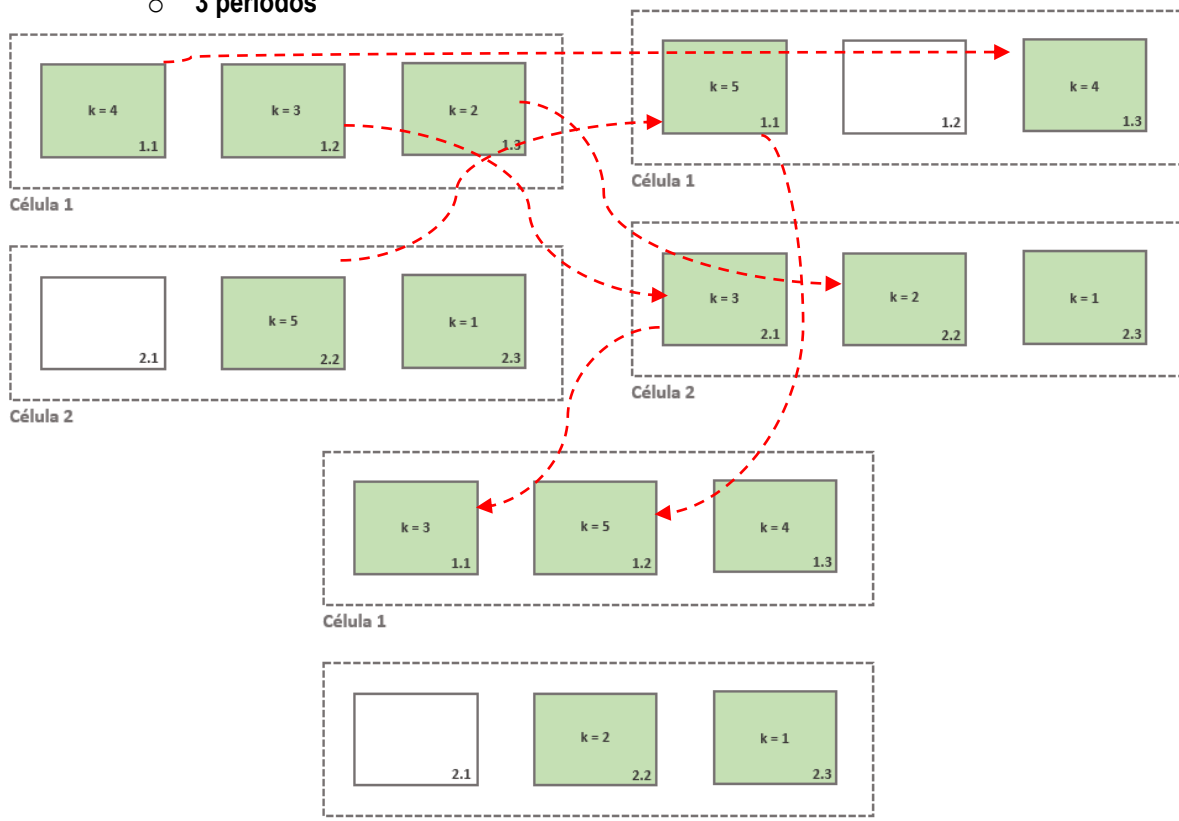


Figura 26 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso I (tres periodos)

Los costes de los diferentes escenarios son:

- **1 periodo:**

Los costes del modelo **lineal** y **no lineal**, son los mismos:

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
29000	250000	6991	5000	1760	0	292751

Tabla 61 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso I

Las cantidades a fabricar son:

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250
3	1	350
	2	0

Tabla 62 Cantidad de piezas fabricadas modelo 4 Caso I

Es un resultado razonable, ya que el modelo realiza los mismos movimientos intracelular e intercelulares aunque la distribución sea distinta (están a la inversa), se han fabricado el mismo número de piezas en la mismas rutas y el los cambios de módulos son los mismos. En cuanto al coste de reconfiguración, el coste que aparece es el de colocar una máquina a su localización.

- **2 periodos:**

MODELO	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
NO LINEAL	62000	0	11115	5800	2540	3000	84455
LINEAL	57000	0	12980	7700	2100	1750	81530

Tabla 63 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso I

Y las cantidades a fabricar en el modelo no lineal:

PERIODO 1		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	450
2	1	0
	2	0
3	1	750
	2	0

PERIODO 2		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
2	1	0
	2	250
3	1	0
	2	0

Las cantidades a fabricar en el modelo lineal:

PERIODO 1		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	200
2	1	0
	2	0

PERIODO 2		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	250
	2	0
2	1	0
	2	250

3	1	750	3	1	0
	2	0		2	0

Tabla 64 Cantidades a fabricar modelo 4 (lineal/ no lineal)

Ambos modelos, no han dado una solución óptima, por lo que se contemplan como “feasible”. Como se puede observar, no hay costes de movimientos intercelulares. En el primer periodo, según la secuencia de operaciones, la fabricación de la demanda 2 necesitaba hacer un cambio de célula, pero al ser la demanda de la pieza 2 igual a 0 en este periodo no se produce movimiento alguno.

En el segundo periodo, el modelo no lineal solo se fabrica la pieza 2 (las piezas 1 y 3 se han completado con el primer periodo), y este periodo la distribución cambia por lo que solo se produce movimiento intracelular.

Otra de las diferencias más notables es el coste de reconfiguración entre periodos, ya que en el modelo lineal se hacen más cambios que en el modelo no lineal, que solo realiza uno. Aparece un nuevo coste de inventario que solo podrá ser realizado del periodo 1 al 2.

Por otro lado, se aprecia cambios de rutas en las piezas de un periodo a otro esto hará que los tiempos de procesados cambien debido a que se utilizan máquinas diferentes según las rutas y, como se ha comentado anteriormente, a que en el modelo se establezcan otros movimientos.

En el siguiente gráfico se puede establecer la forma visual de los costes que hemos mencionado antes:

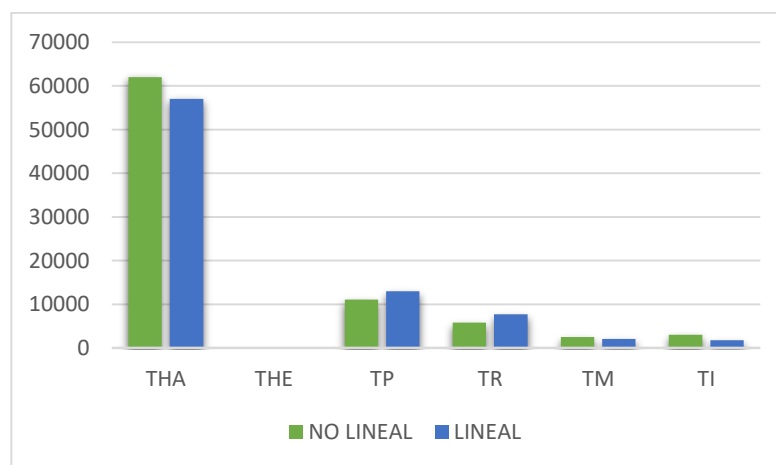


Figura 27 Diagrama costes modelo 4 (lineal y no lineal) Caso I

• 3 periodos:

MODELO	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
NO LINEAL	84000	450000	15709	8700	2740	4750	565899
LINEAL	87303,9	411101,69	1643,51	11300	2920	6301,14	518926,73

Tabla 65 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso I

Y las cantidades a fabricar por ruta son en el modelo no lineal:

PERIODO 1			PERIODO 2			PERIODO 3		
MAQ	CELULA	POSIC	MAQ	CELULA	POSIC	MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3	1	2	1	1	2	1
2	1	1	2	1	1	2	1	1
3	1	2	3	1	2	3	1	2
4	2	2	4	1	3	4	2	2
5	1	3	5	2	3	5	2	3

Tabla 66 Cantidades de piezas a fabricar (no lineal) Caso I

Y las cantidades a fabricar por ruta son en el modelo lineal:

PERIODO 1			PERIODO 2			PERIODO 3		
MAQ	CELULA	POSIC	MAQ	CELULA	POSIC	MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3	1	2	3	1	2	3
2	1	3	2	2	2	2	2	2
3	1	2	3	2	1	3	1	1
4	1	1	4	1	3	4	1	3
5	2	2	5	1	1	5	1	2

Tabla 67 Cantidades de piezas a fabricar (lineal) Caso I

Este escenario se puede interpretar del mismo modo que el anterior, 2 periodos, pero teniendo en cuenta que existe un periodo más por lo que ahora habría que cubrir la demanda de 3 periodos y variarían los datos de inventario, etc. Se puede ver las diferencias entre modelo lineal / no lineal en el siguiente gráfico:

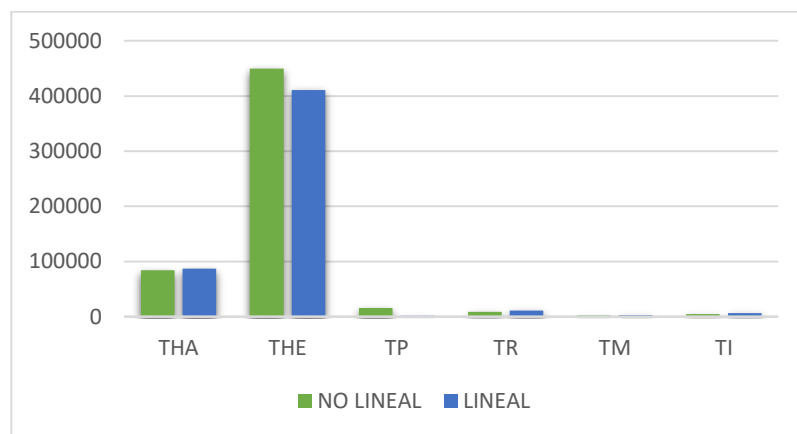


Figura 28 Diagrama comparación modelo 4 (lineal y no lineal) Caso I

Por último, para comparar los resultados de todos los modelos del caso 1 en su conjunto, se analizarán las siguientes gráficas:

- **Tiempo de computación de los modelos**

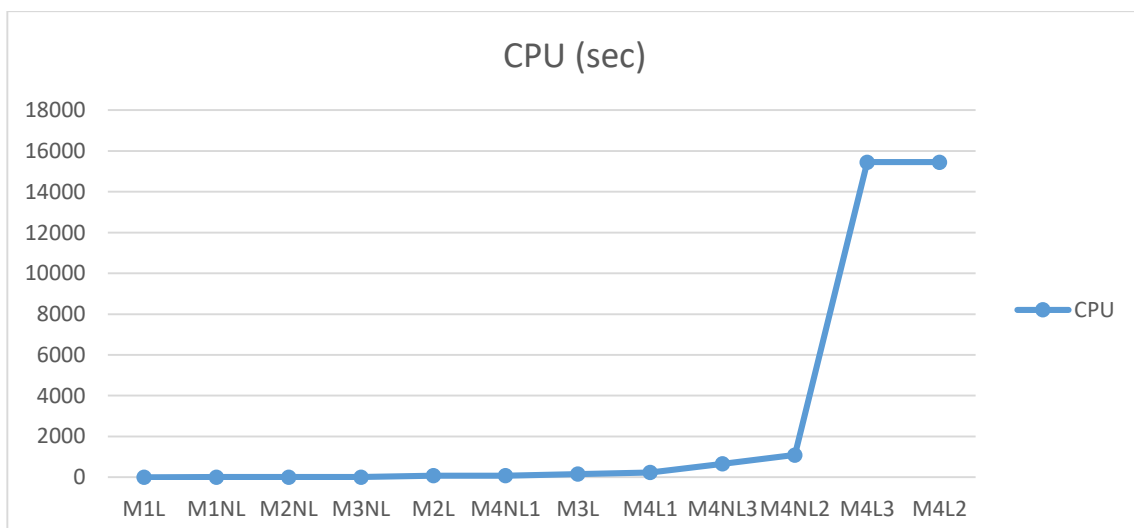


Figura 29 Gráfico comparativo de tiempos de computación entre modelos (Caso I).

En este gráfico, se comparan los tiempos de computación de menor a mayor tiempo en segundos. Se observa

que los modelos de un periodo siguen una línea exponencial, una vez que se llega a los modelos con varios periodos, resulta complejo de resolver y no llegan a obtener el óptimo (se ha fijado un tiempo máximo de computación de 4 horas).

- **Costes función objetivos**

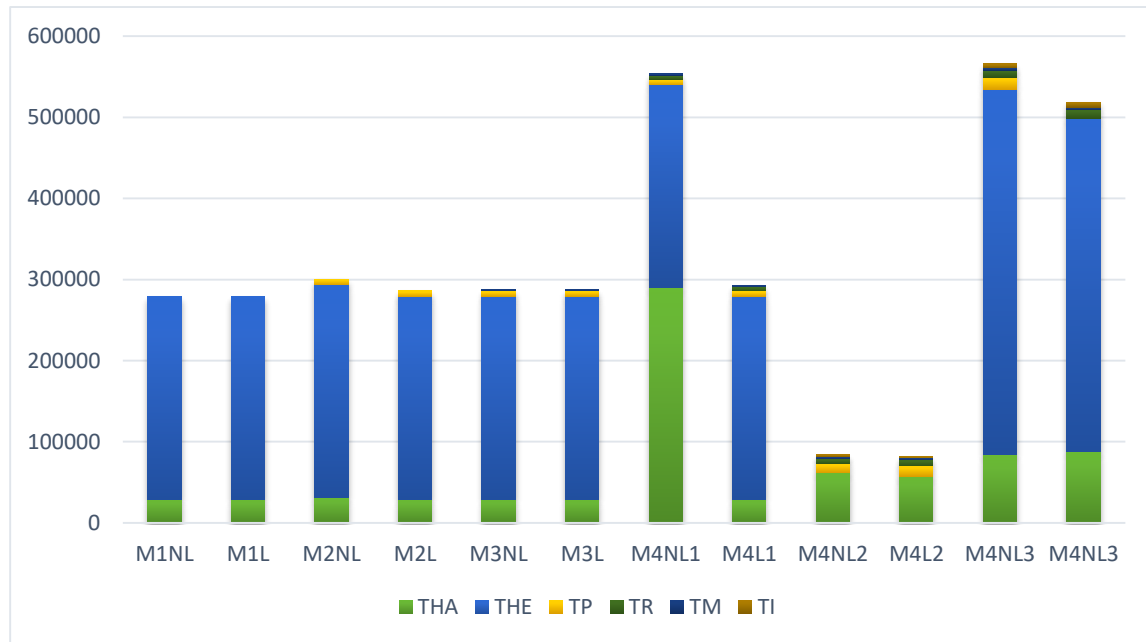


Figura 30 Gráfico costes totales de todos los modelos implicados (Caso I).

Los costes más diferenciadores son los de intracelular e intercelular, el cual es común para todos los modelos. Como se puede ver en el gráfico, los costes más altos son los de movimientos intercelular. Como se ha comentado anteriormente, en este modelo se les da mucha importancia a los costes de estos movimientos, debido a que se suelen utilizar mecanismos que eleven el coste de transporte.

Los costes de tiempo de procesado no son muy diferentes, se mantiene en línea en todos los modelos donde se contempla este coste. Lo mismo ocurre con los demás costes, que solo se encuentran en el modelo 4. Es decir, los costes de reconfiguración, de cambio de módulo y de inventario, se mantienen en línea en cada uno de los modelos.

5.3.2. Resultados Caso 2

En este apartado, se irán mostrando los resultados obtenidos de cada modelo, tal como se ha realizado en el caso anterior para, finalmente, realizar comparativas de los modelos y obtener diferentes conclusiones.

5.3.2.1. Modelo 1

El modelo 1, en este caso 2, asigna las 5 máquinas a las ubicaciones repartidas entre las 2 células, es decir, en un total de 8 ubicaciones posibles. Para tener un resultado visual, se presentará un gráfico, en donde se rellenará las ubicaciones en donde se ha asignado cada máquina.

En ambos escenarios, la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global.

- **No Lineal:**

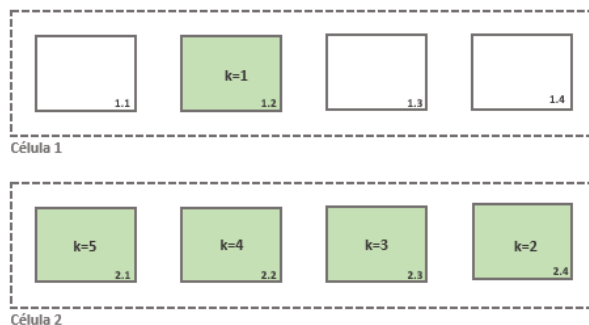


Figura 31 Distribución en planta modelo 1 (no lineal) Caso II

- **Lineal:**

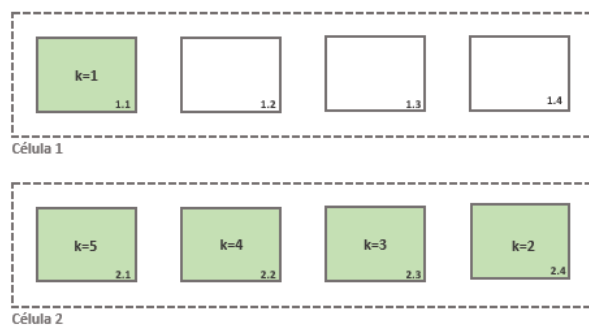


Figura 32 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II

El coste coincide en cada uno de los modelos (medidos en u.m):

THA	THE	TOTAL
52000	0	52000

Parte (i)	Ruta (r)	Secuencia de operaciones Machine k		
		s=1	s=2	s=3
1	2	5	4	3
2	1	1	1	1
3	2	4	3	2
4	2	4	5	5
5	1	2	4	3

Tabla 68 Secuencia de operaciones Caso II

Este resultado tendría sentido, ya que ambos modelos (no lineal / lineal) generan la misma asignación de máquinas, cambiando la posición de la máquina 1. Esto no interfiere, ya que los movimientos según la secuencia de operaciones, no requiere realizar ningún movimiento intercelular.

5.3.2.2. Modelo 2

En el modelo 2, aparte de las asignaciones de máquinas, también se muestra las cantidades de piezas que se fabrican según la ruta en la que se hayan realizado.

En ambos escenarios, la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global.

- **No Lineal:**

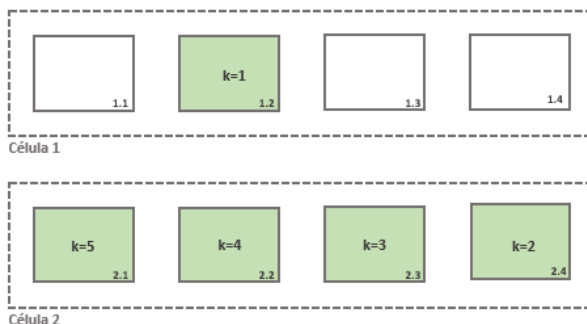


Figura 33 Distribución en planta modelo 2 (no lineal) Caso II

- **Lineal:**

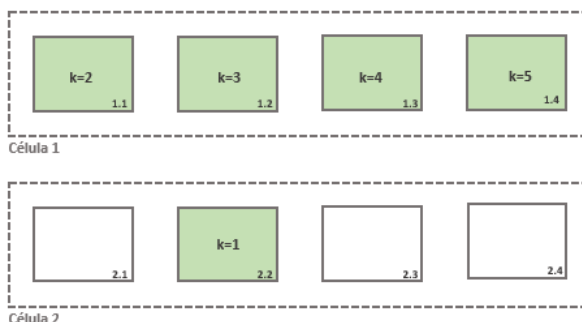


Figura 34 Distribución en planta modelo 2 (lineal) Caso II

Los costes son los mismos en el modelo lineal y el no lineal (medidos en u.m):

THA	THE	TP	TOTAL
52000	0	13055	65055

Tabla 69 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso II

Tal y como se ha mostrado en el modelo anterior, según la secuencia de operaciones, no es necesario hacer movimientos intercelulares. En este modelo aparece un nuevo valor de costes, el tiempo de procesado.

Las piezas fabricadas coinciden en ambos modelos:

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0

	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	350
	2	0

Tabla 70 Piezas fabricadas Modelo 2 Caso II

5.3.2.3. Modelo 3

En ambos escenarios, la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global.

- **No Lineal:**

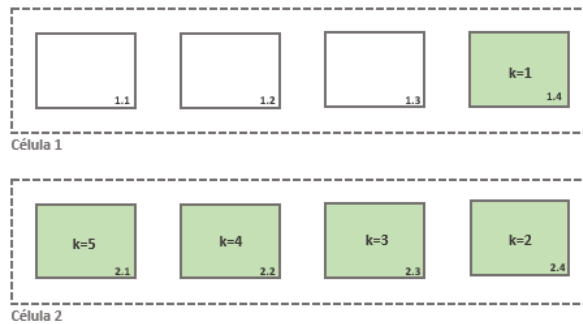


Figura 35 Distribución en planta modelo 3 (no lineal) Caso II

- **Lineal:**

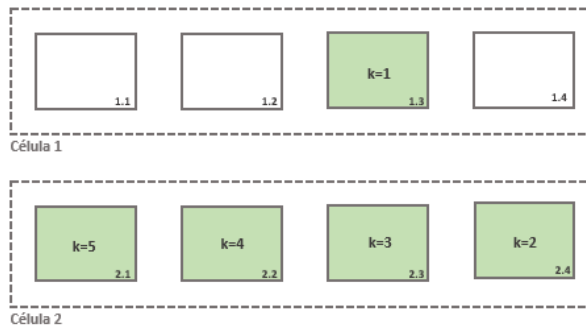


Figura 36 Distribución en planta modelo 2 (lineal) Caso II

El coste total coincide en ambos modelos (medidos en u.m):

THA	THE	TP	TM	TOTAL
54796,6	0	12954,32	2880	70630,92

Tabla 71 Función objetivo (costes) modelo 3 Caso II

Las piezas fabricadas coinciden en ambos modelos, es el mismo que en el anterior modelo:

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400

2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	139,89

Tabla 72 Piezas fabricadas Modelo 3 Caso II

Los resultados de los costes tienen sentido que sean iguales, ya que las posiciones son las mismas, pero intercambiando las células. Según la secuencia de operaciones, ambos modelos recorren los mismos movimientos intracelulares. A destacar, en este modelo se consideran las dos rutas para fabricar la pieza 5, 210,17 piezas, se realizan mediante la ruta 1 y 139,89 piezas, se producen mediante la ruta 2.

Los costes de cambio de módulos son los mismos debido a que el número de módulos usados es el mismo en cada uno de los modelos.

5.3.2.4. Modelo 4

Este modelo consta de 3 escenarios posibles, como se ha comentado en capítulos anteriores. Los posibles escenarios son:

- ✓ Modelo 4, no lineal, 1 periodo
- ✓ Modelo 4, lineal, 1 periodo
- ✓ Modelo 4, no lineal, 2 periodo
- ✓ Modelo 4, lineal, 2 periodo
- ✓ Modelo 4, no lineal, 3 periodo
- ✓ Modelo 4, lineal, 3 periodo

En los 2 escenarios de 1 periodo la ejecución ha llegado hasta el final y por tanto el modelo lineal alcanza el óptimo global. Pero en 4 los escenarios de 2 y 3 periodos, la ejecución se ha interrumpido antes de alcanzar el óptimo y la solución es “feasible” sin garantía de optimalidad.

A continuación, se mostrarán las asignaciones máquina-célula-posición obtenidas:

- **No Lineal:**
 - **1 periodo:**

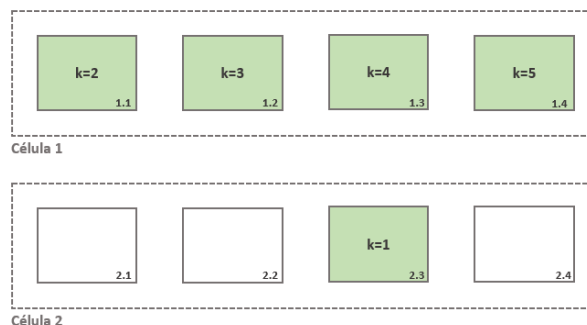


Figura 37 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso II (un periodo)

- 2 periodos:

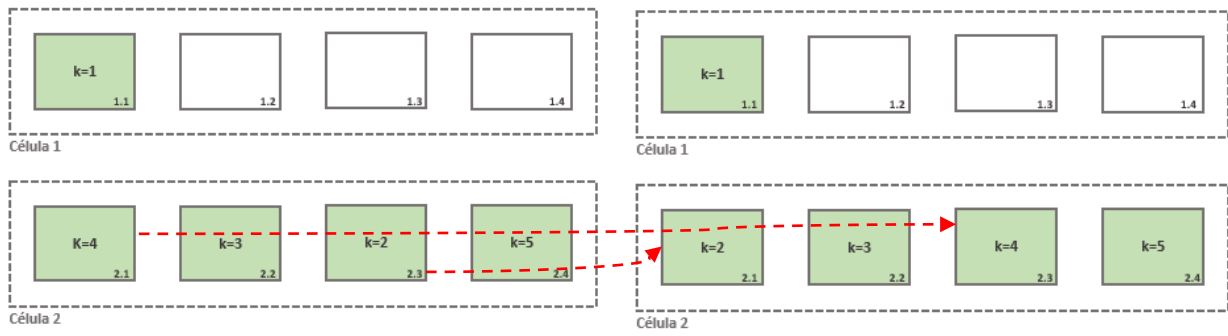


Figura 38 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso II (dos periodos)

- 3 periodos

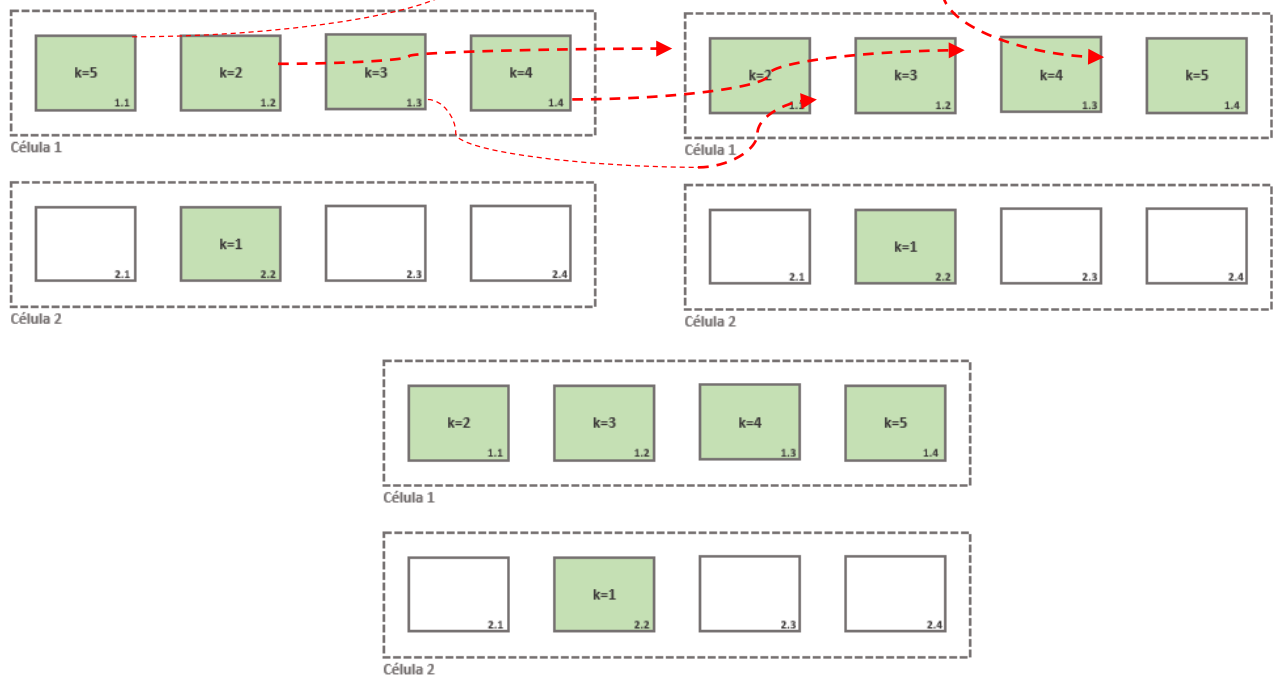


Figura 39 Distribución en planta modelo 4 (no lineal) Caso II (tres periodos)

- Lineal:

- 1 periodo

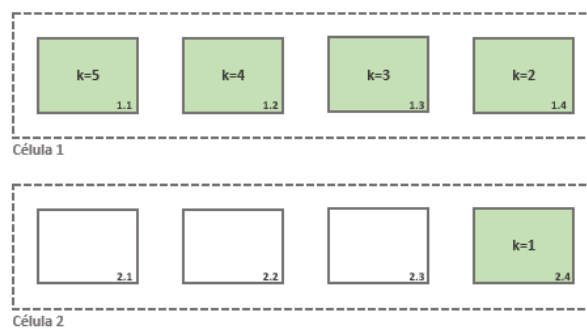


Figura 40 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II (un periodo)

○ 2 periodo

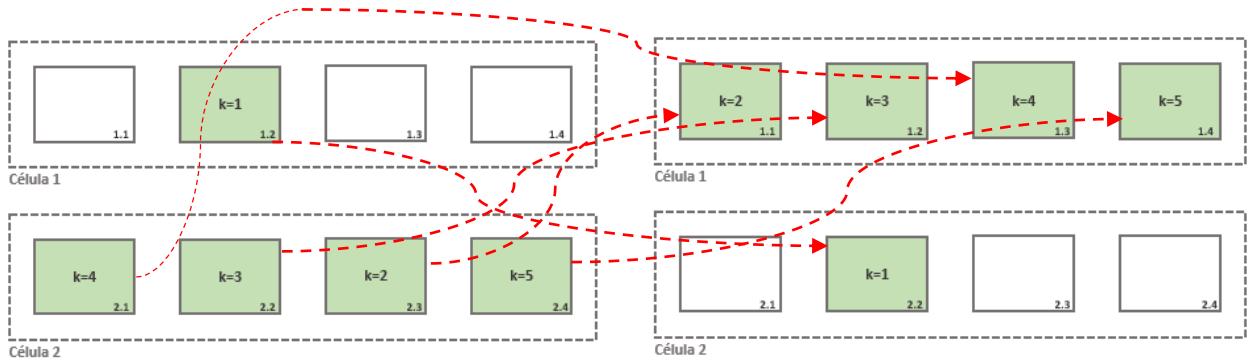


Figura 41 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II (dos periodos)

○ 3 periodos

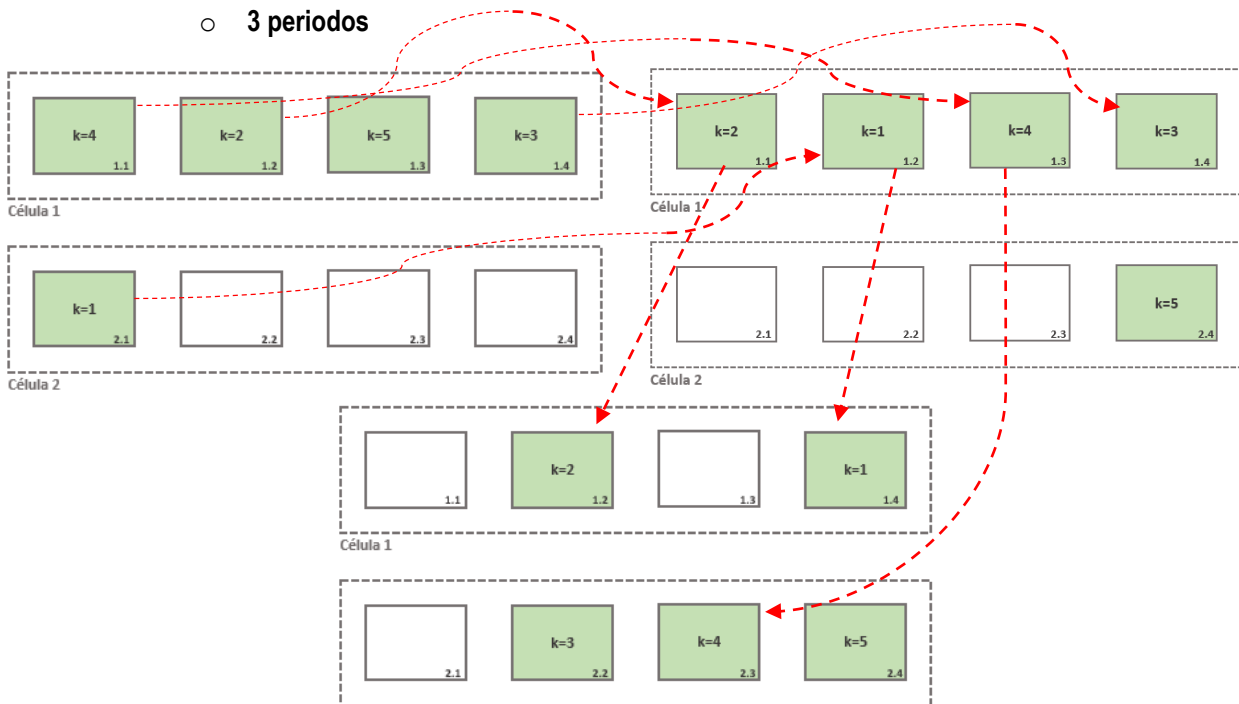


Figura 42 Distribución en planta modelo 4 (lineal) Caso II (3 periodos)

Los costes de los diferentes escenarios son:

• 1 periodo:

Los costes del modelo **lineal** y **no lineal**, son los mismos (medidos en u.m):

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
54796,61	0	12954,32	5000	2880	0	75630,93

Tabla 73 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso II (un periodo)

Las cantidades a fabricar son:

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0

	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	139,89

Tabla 74 Piezas fabricadas Modelo 4 Caso II (un periodo)

Es un resultado razonable, ya que el modelo realiza los mismos movimientos intracelulares, aunque la distribución sea distinta, el cambio de la máquina 1 en la célula 2, no interfiere. Se han fabricado el mismo número de piezas en las mismas rutas y los cambios de módulos son los mismos. En cuanto al coste de reconfiguración, el coste que aparece es el de colocar una máquina a su localización.

- **2 periodos:**

MODELO	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
NO LINEAL	89559,32	0	24723,14	6900	3840	1110,17	126132,63
LINEAL	93000	0	24607	10000	2460	1750	131817

Tabla 75 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso II (dos periodos)

Como se puede observar la solución del modelo lineal no es óptima pues ha sido interrumpida su ejecución y la solución del modelo no lineal alcanza un óptimo local.

Y las cantidades a fabricar en el modelo no lineal:

PERIODO 1			PERIODO 2		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD	PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	300	1	1	0
	2	0		2	400
2	1	350	2	1	150
	2	0		2	0
3	1	0	3	1	0
	2	200		2	250
4	1	0	4	1	0
	2	0		2	250
5	1	0	5	1	127,97
	2	622,03		2	0

Tabla 76 Cantidades fabricadas Modelo 4 (no lineal) Caso II (dos periodos)

Las cantidades a fabricar en el modelo lineal:

PERIODO 1			PERIODO 2		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD	PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0	1	1	0
	2	300		2	400
2	1	350	2	1	150

	2	0
3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	750

	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	0
	2	0

Tabla 77 Cantidades fabricadas Modelo 4 (lineal) Caso II (dos periodos)

Como se puede observar, no hay costes de movimientos intercelulares. En el primer periodo, según la secuencia de operaciones, la fabricación de la demanda 2 necesitaba hacer un cambio de célula, pero al ser la demanda de la pieza 2 igual a 0 en este periodo, no se produce movimiento alguno. Otra de las diferencias más notables es el coste de reconfiguración entre periodos, ya que en el modelo lineal se hacen más cambios que en el modelo no lineal. Aparece un nuevo coste de inventario que solo podrá ser realizado del periodo 1 al 2.

Por otro lado, el rutado que utilizan las piezas 1 y 5 cambian de una ruta según el periodo, lo que conlleva al cambio del tiempo de procesado según las máquinas que se hayan cambiado al utilizar una ruta distinta a la que se ha usado en el primer periodo.

En el siguiente gráfico se puede establecer la forma visual de los costes que hemos mencionado antes. Se observa que el modelo lineal establece unos costes más elevados:

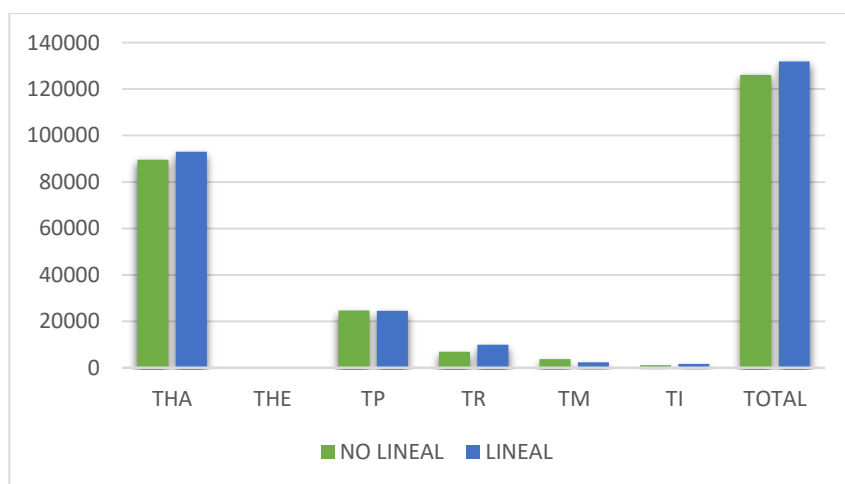


Figura 43 Gráfico de costes Modelo 4 (lineal / no lineal) Caso II (dos periodos)

• 3 periodos:

MODELO	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
NO LINEAL	122559,32	0	31917,64	9100	3700	1110,17	168387,13
LINEAL	227722,11	1554318,34	33061,93	12800	4240	4005,74	1836148,1

Tabla 78 Función objetivo (costes) modelo 4 Caso II (tres periodos)

Como se puede observar, igual que ocurría con 2 periodos, la solución del modelo lineal es muy pobre pues ha sido interrumpida su ejecución y la solución del modelo no lineal alcanza un óptimo local.

Y las cantidades a fabricar por ruta son en el modelo no lineal:

PERIODO 1			PERIODO 2			PERIODO 3		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD	PIEZA	RUTA	CANTIDAD	PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	300	1	1	0	1	1	0
	2	0		2	400		2	200
2	1	350	2	1	150	2	1	0
	2	0		2	0		2	0
3	1	0	3	1	0	3	1	0
	2	200		2	250		2	300
4	1	0	4	1	0	4	1	0
	2	0		2	250		2	200
5	1	0	5	1	127,97	5	1	150
	2	622,03		2	0		2	0

Tabla 79 Cantidades fabricadas Modelo 4 (no lineal) Caso II (tres periodos)

Y las cantidades a fabricar por ruta son en el modelo lineal:

PERIODO 1			PERIODO 2			PERIODO 3		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD	PIEZA	RUTA	CANTIDAD	PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0	1	1	0	1	1	0
	2	587,94		2	112,06		2	200
2	1	0	2	1	150	2	1	0
	2	350		2	0		2	0
3	1	0	3	1	0	3	1	0
	2	282,46		2	175,44		2	292,11
4	1	0	4	1	447,76	4	1	2,24
	2	0		2	0		2	0
5	1	0	5	1	424,91	5	1	0
	2	475,09		2	0		2	0

Tabla 80 Cantidades fabricadas Modelo 4 (no lineal) Caso II (tres periodos)

Este escenario se puede interpretar del mismo modo que el anterior, 2 periodos, pero teniendo en cuenta que existe un periodo más por lo que ahora habría que cubrir la demanda de 3 periodos y variarían los datos de inventario, etc. Como se ha comentado anteriormente en el caso 1, la solución computacional de estos modelos no es óptima, sino que el resultado es "feasible". Pero, haciendo una comparativa entre ambos modelos, el lineal, establece peores resultados ya que, existen bastantes cambios de reconfiguración de un modelo a otro que implican que haya un coste elevado de movimientos intercelulares. Se puede ver las diferencias entre modelo lineal / no lineal en el siguiente gráfico:

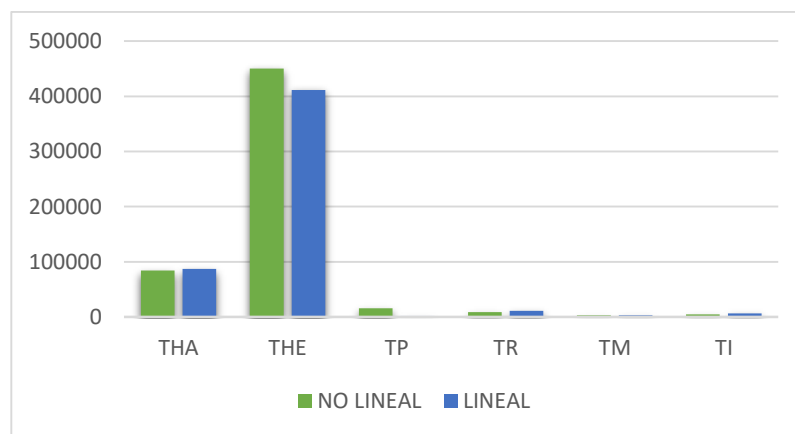


Figura 44 Gráfico de costes Modelo 4 (lineal / no lineal) Caso II (tres periodos)

Por último, para comparar los resultados de todos los modelos del caso 1 en su conjunto, se analizarán las siguientes gráficas:

- **Tiempo de computación de los modelos**

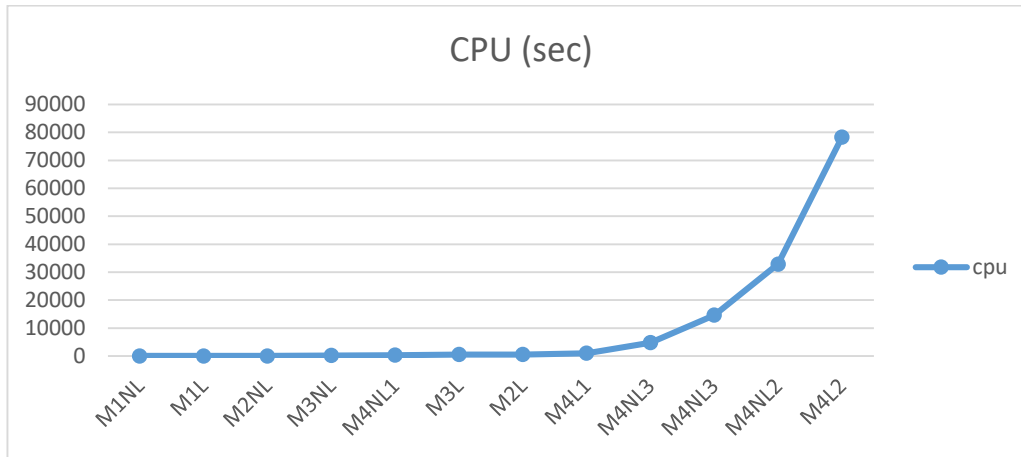


Figura 45 Gráfico comparativo de tiempos de computación entre modelos (Caso II).

En este gráfico, se comparan los tiempos de computación de menor a mayor tiempo en segundos. Se observa que los modelos de un periodo siguen una línea exponencial, una vez que se llega a los modelos con varios periodos, resulta complejo de resolver y no llegan a obtener el óptimo.

- **Costes función objetivos**

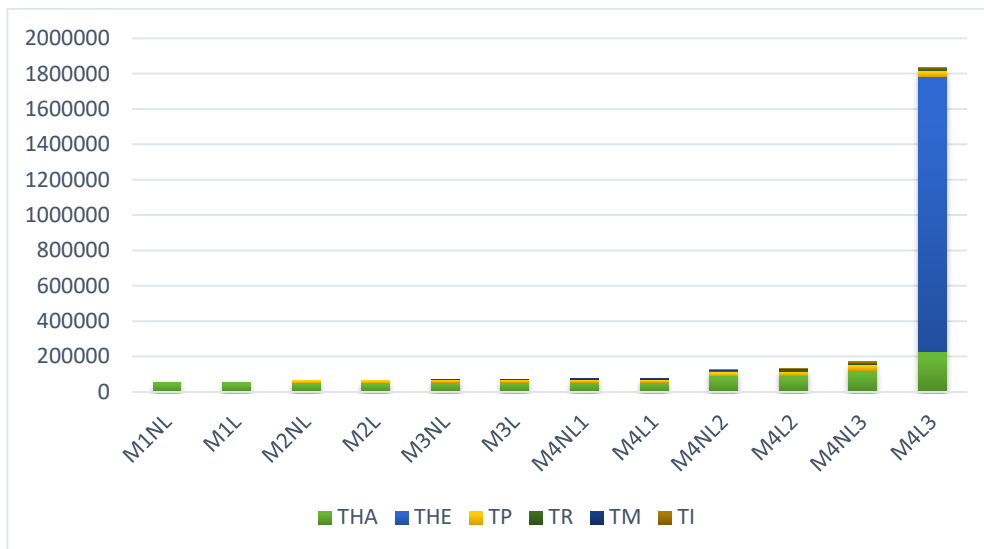


Figura 46 Gráfico costes totales de todos los modelos implicados (Caso II).

En este caso, se puede observar una diferencia clara, como es el movimiento intercelular. En este caso, los modelos han optimizado la distribución en planta, para que de esa manera no existan costes intercelulares. Al hacer este coste igual a cero, el modelo tiende a reconfigurar la distribución en planta y eleva su coste. Si comparamos ambos costes, el movimiento intercelular es mucho más castigado en el modelo, ya que como se ha comentado anteriormente, los modelos matemáticos se han diseñado de forma que establecen mayor calidad de distribución en planta frente a otros aspectos.

Los costes de tiempo de procesado no son muy diferentes, se mantiene en línea en todos los modelos donde se contempla este coste. Lo mismo ocurre con los demás costes, que solo se encuentran en el modelo 4. Es decir, los costes de reconfiguración, de cambio de módulo y de inventario, se mantienen en línea en cada uno de los modelos.

5.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad pretende estudiar el comportamiento de los resultados del problema ante cambios en los valores de los parámetros. Para ello se van a estudiar dos grupos de parámetros:

- Análisis de Costes
- Análisis de Capacidades

Todos los análisis se realizarán sobre el caso más completo (Caso 2 y Modelo 4), cuando no sea necesario se ejecutará con un único periodo.

5.4.1. Análisis de costes

5.4.1.1. Análisis sobre costes de movimientos intra e inter- celulares

Cuando se hace un análisis de los resultados de cualquier escenario, se observa que los costes asociados a los movimientos dominan sobre el resto de costes. La razón es que se han usado unos costes unitarios de movimientos inter e intra-celulares altos para dar más importancia a la distribución de máquinas en la planta que a la asignación de rutas de fabricación y módulos auxiliares a las máquinas reconfigurables.

Por eso, en este apartado se va a analizar el efecto de reducir los costes unitarios de movimientos para hacerlos del mismo orden de magnitud que el resto de costes.

Para ello, se va a elegir el escenario del caso 2 modelo 4 con un periodo. En ese escenario se va a reducir 1/10 los valores de los costes unitarios de movimientos, es decir:

	Valores iniciales	Nuevos valores
CA: Coste intra-celular	10	1
CE: Coste inter-celular	25	2.5

Tabla 81 Datos de experimentación en costes intracelulares / intercelulares

Como resultado respecto del anterior escenario se obtiene:

COSTES	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
INICIAL	54796,61	0,00	12954,32	5000,00	2880,00	0,00	75630,93
NUEVO	5700,00	0,00	12835,00	5000,00	2460,00	0,00	25995,04

DISTRIBUCIÓN INICIAL		
MAQ	CELULA	POSIC
1	2	4
2	1	4
3	1	3
4	1	2
5	1	1

DISTRIBUCIÓN NUEVA		
MAQ	CELULA	POSIC
1	1	4
2	2	2
3	2	1
4	2	3
5	2	4

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: INICIAL		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: NUEVO		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	400
	2	0
2	1	150

	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	239,83

	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	0
	2	350

Tabla 82 Resultados de experimentación en costes de movimientos intracelulares / intercelulares

Se observa:

- Cambios en la distribución de máquinas dentro de las células
- Cambios en las rutas de las partes 1 y 5
- Los costes de movimientos intercelulares se reducen algo menos de 1/10 y se hacen del mismo orden de magnitud que el resto de costes
- Los costes de procesado se reducen por el cambio de rutas, debido a que aumenta el uso de las máquinas 2 y 3, y se reduce el uso de las máquinas 4 y 5
- Los costes de asignación de módulos se reducen también por el cambio de rutas

5.4.1.2. Análisis sobre costes de procesados

Se va a utilizar como referencia este último escenario con los costes unitarios de movimientos ya reducidos 1/10. Y se va a analizar el efecto que provoca un aumento del triple en los costes unitarios de procesado de la máquina 3 que es la que menor coste tiene.

Para ello, se va a elegir el escenario del caso 2 modelo 4 con un periodo. En ese escenario se va a aumentar 3 veces el valor del coste unitario de procesado de la máquina 3, es decir:

	Valores iniciales	Nuevos valores
C_{p3}: Coste procesado máq. 3	5	15
CA: Coste intra-celular	10	1
CE: Coste inter-celular	25	2.5

Tabla 83 Datos de experimentación sobre costes de procesados

Como resultado respecto del anterior escenario se obtiene:

COSTES	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
INICIAL	5700,00	0,00	12835,00	5000,00	2460,00	0,00	25995,04
NUEVO	5900,00	0,00	18053,00	5000,00	2460,00	0,00	31413,04

DISTRIBUCIÓN INICIAL		
MAQ	CELULA	POSIC
1	1	4
2	2	2
3	2	1
4	2	3
5	2	4

DISTRIBUCIÓN NUEVA		
MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	1	4
3	1	3
4	1	2
5	1	1

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: INICIAL		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	400
	2	0
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	0
	2	350

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: NUEVO		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	0
	2	350

Tabla 84 Resultados experimentación en costes de procesados

Se observa:

- Cambios en la ruta de la parte 1: uso de máquinas 5-4-3 (ruta 2), en lugar de 3-2-4 (ruta 1). Se elige la otra ruta porque los tiempos de cada operación en la máquina 3 son menores (0.44h frente a 0.73h)
- Cambios en la distribución de máquinas dentro de la célula: se sitúan siguiendo el nuevo orden de la ruta

Consecuencias en costes:

- Los costes de movimientos intracelulares aumentan por la nueva distribución de máquinas debido a la ruta de la parte 5
- Los costes de procesado pasan a ser importantes y por eso el aumento de esos costes por el cambio de ruta de la parte 1 es menor que si se hubiese mantenido la otra ruta, a costa de aumentar algo los costes de movimientos
- El resto de costes se mantienen

5.4.1.3. Análisis sobre costes de reconfiguración

Para analizar el coste de reconfiguración, se necesitan estudiar modelos que tengan más de un periodo para estudiar el impacto, que provoca este coste, de un periodo a otro. Para ello, se va a elegir el escenario del caso 2 modelo 4 (no lineal) con dos periodos. En ese escenario se va a elevar en 5 veces el coste de reconfiguración, es decir:

CR _k	1	2	3	4	5
INICIAL	900	1100	1000	800	1200
NUEVO	4500	5500	5000	4000	6000

Tabla 85 Datos de experimentación sobre costes de reconfiguración

Como resultado respecto del anterior escenario se obtiene:

COSTES	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
INICIAL	89559,32	0,00	24723,14	6900	3840	1110,17	126132,66
NUEVO	96000,00	0,00	25147,00	25000,00	2860,00	699,15	149706,18

DISTRIBUCIÓN INICIAL PERIODO 1		
MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	3
3	2	2
4	2	1
5	2	4

DISTRIBUCIÓN INICIAL PERIODO 2		
MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	1
3	2	2
4	2	3
5	2	4

DISTRIBUCIÓN NUEVA PERIODO 1		
MAQ	CELULA	POSIC
1	2	4
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

DISTRIBUCIÓN NUEVA PERIODO 2		
MAQ	CELULA	POSIC
1	2	4
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: INICIAL (PERIODO 1)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	300
	2	0
2	1	350
	2	0
3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	622,03

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: INICIAL (PERIODO 2)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	127,97
	2	0

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: NUEVO (PERIODO 1)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	300
2	1	350
	2	0

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: NUEVO (PERIODO 2)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0

3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	539,83
	2	0

3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	0

Tabla 86 Resultados experimentación en costes de reconfiguración

Se observa:

- Al elevarse los costes de reconfiguración la distribución en planta de las diferentes máquinas se ha mantenido de un periodo a otro. El coste de reconfiguración, en este caso, solo tiene en cuenta el coste de asignar las máquinas en el primer periodo, por lo tanto, al elevar los costes de reconfiguración en el nuevo modelo, estos costes también serán mayores que el anterior.
- Se analiza un cambio de ruta en las piezas 1 y 5, que elevan los costes de tiempo de procesado.

5.4.1.4. Análisis sobre costes de inventarios

Al igual que el escenario anterior, para analizar el coste de reconfiguración, se necesitan estudiar modelos que tengan más de un periodo para estudiar el impacto, que provoca este coste, de un periodo a otro. Para ello, se va a elegir el escenario del caso 2 modelo 4 (no lineal) con dos periodos. En ese escenario se va a aumentar en 10 unidades el coste de inventario, es decir:

CH_t	1	2
INICIAL	5	5
NUEVO	50	50

Tabla 87 Datos de experimentación sobre costes de inventarios

Como resultado respecto del anterior escenario se obtiene:

COSTES	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
INICIAL	89559,32	0,00	24723,14	6900,00	3840,00	1110,17	126132,66
NUEVO	97082,32	0,00	24781,18	6900,00	3040,00	0,00	131803,54

DISTRIBUCIÓN INICIAL PERIODO 1		
MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	3
3	2	2
4	2	1
5	2	4

DISTRIBUCIÓN NUEVA PERIODO 2		
MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	1
3	2	2
4	2	3
5	2	4

DISTRIBUCIÓN NUEVA PERIODO 1

DISTRIBUCIÓN NUEVA PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	1
2	1	3
3	1	2
4	1	1
5	1	4

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	1
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: INICIAL (PERIODO 1)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	300
	2	0
2	1	350
	2	0
3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	622,03

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: INICIAL (PERIODO 2)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	127,97
	2	0

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: NUEVO (PERIODO 1)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	285,71
	2	14,29
2	1	350
	2	0
3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	400

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: NUEVO (PERIODO 2)		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	139,83

Tabla 88 Resultados experimentación en costes de inventario

Se observa:

- Al elevar tanto los costes de inventario, se fabrica exactamente lo que se demanda en cada periodo, sin dejar inventario al final del periodo 1.

5.4.2. Análisis de Capacidades

5.4.2.1. Análisis de capacidades de las máquinas

Cuando se hace un análisis de los resultados de cualquier escenario, se observa que las capacidades de las máquinas están muy por encima del uso que se les da (en horas de funcionamiento). Por eso, en este apartado se va a analizar el efecto de reducir las capacidades de las máquinas para ajustarla a su uso.

Para ello, se va a elegir el escenario del caso 2 modelo 4 con un periodo y los parámetros ya cambiados de costes unitarios de movimientos y de procesado.

En ese escenario se van a reducir en primer lugar las capacidades de todas las máquinas a 500 horas en lugar de 700 horas, es decir:

	Valores iniciales	Nuevos valores
H_k: Capacidad máquinas	700	500
C^p₃: Coste procesado máq. 3	5	15
CA: Coste intra-celular	10	1
CE: Coste inter-celular	25	2.5

Tabla 89 Datos de experimentación sobre capacidades de la máquina

Como resultado se tiene que no existe solución admisible (No feasible solution). Esto se debe a que la máquina 3, con las demandas a fabricar, tiene un uso mínimo de 525 horas, ya que las partes 1, 2 y 3 en ambas rutas usa la máquina 3, y seleccionando la ruta con menor tiempo de procesado y multiplicando por las demandas se obtiene ese valor.

Por ello, en ese escenario se van a reducir las capacidades de todas las máquinas a 500 horas en lugar de 700 horas, excepto en la máquina 3 que se reduce a 600 horas, es decir:

	Valores iniciales	Nuevos valores
H₁: Capacidad máquinas 1	700	500
H₂: Capacidad máquinas 2	700	500
H₃: Capacidad máquinas 3	700	600
H₄: Capacidad máquinas 4	700	500
H₅: Capacidad máquinas 5	700	500
C^p₃: Coste procesado máq. 3	5	15
CA: Coste intra-celular	10	1
CE: Coste inter-celular	25	2.5

Tabla 90 Datos de experimentación sobre capacidades de la máquina

Como resultado respecto del anterior escenario se obtiene:

COSTES	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
INICIAL	5900,00	0,00	18053,00	5000,00	2460,00	0,00	31413,04
NUEVO	5524,31	0,00	18513,17	5000,00	3040,00	0,00	32077,52

DISTRIBUCIÓN INICIAL		
MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	1	4
3	1	3
4	1	2
5	1	1

DISTRIBUCIÓN NUEVA		
MAQ	CELULA	POSIC
1	1	3
2	2	1
3	2	2
4	2	3
5	2	4

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: INICIAL		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	0
	2	350

PIEZAS FABRICADAS POR RUTA: NUEVO		
PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	87,82
	2	312,18
2	1	150,00
	2	0,00
3	1	0,00
	2	250,00
4	1	0,00
	2	250,00
5	1	275,66
	2	74,34

Z EN MÁQUINAS (INICIAL)	
MODULO	MOD USADOS
1	3
2	3
3	2
4	3
5	4

Z EN MÁQUINAS (NUEVO)	
MODULO	MOD USADOS
1	3
2	3
3	3
4	3
5	4

Tabla 91 Resultados experimentación en capacidades de las máquinas

Se observa:

- Cambios en la ruta de la parte 1, se hace uso de las dos rutas: uso de máquinas 5-4-3 (ruta 2) para realizar 312,18 y 3-2-4 (ruta 1) para 87,82 partes. Con este resultado, la mayor parte de las piezas fabricadas se realizan en la ruta 2, que conlleva menor recorrido intracelular.
- Cambios en la ruta de la parte 5, la mayor parte de las piezas se fabrican ahora en la ruta 1, que disminuye los movimientos intracelulares, aunque los tiempos de procesados de las máquinas aumentan.
- Cambios en la distribución de máquinas dentro de la célula: se sitúan siguiendo el nuevo orden de la ruta.

Consecuencias en costes:

- Los costes de movimientos intracelulares disminuyen como consecuencia de que las partes 1 y 5, utilizan las 2 rutas para establecer la demanda.
- Los costes de procesado pasan a ser importantes y por eso el aumento de esos costes por el cambio de ruta de la parte 5, en donde la mayor parte de las piezas se fabrican en la parte 1 que tienen mayor tiempo de procesado.
- Los costes de cambio de módulo aumentan debido a que, los módulos usados en las máquinas 3 y 5 aumentan.

5.4.2.2. Análisis de capacidades de los módulos

Cuando se hace un análisis de los resultados de cualquier escenario del caso 2, se observa que las capacidades de los módulos (número de módulos disponibles de cada tipo en el sistema) están muy ajustados a las necesidades. Por eso, en este apartado se va a analizar el efecto de reducir levemente las cantidades de módulos disponibles para ajustarlo a su uso.

Para ello, se va a elegir el escenario del caso 2 modelo 4 con un periodo y los parámetros ya cambiados del escenario anterior. En ese escenario se van a reducir en primer lugar las capacidades de todos los tipos de módulos de 4 unidades a 3 unidades, es decir:

	Valores iniciales	Nuevos valores
TA₂: Cantidad de módulos	4	3
H₁: Capacidad máquinas 1	700	500
H₂: Capacidad máquinas 2	700	500
H₃: Capacidad máquinas 3	700	600
H₄: Capacidad máquinas 4	700	500
H₅: Capacidad máquinas 5	700	500
C^p₃: Coste procesado máq. 3	5	15
CA: Coste intra-celular	10	1
CE: Coste inter-celular	25	2.5

Tabla 92 Datos de experimentación sobre capacidades de los módulos

Como resultado se tiene que no existe solución admisible (No feasible solution). Esto se debe a que no existe una combinación de rutas donde se puedan usar 3 o menos módulos de todos los tipos.

Por ello, en ese escenario se van a reducir las capacidades de cada tipo de módulo a 3 unidades en lugar de 4, manteniendo el resto en 4 unidades.

COSTES	THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
Inicial	5524,31	0,00	18513,17	5000,00	3040,00	0,00	32077,52
Red. Mód 1	5575,00	0,00	18863,75	5000,00	2880,00	0,00	32318,79
Red. Mód 2	5201,85	25000,00	20362,24	5000,00	2640,00	0,00	58204,13
Red. Mód 3	6198,15	0,00	18497,24	5000,00	2620,00	0,00	32315,42
Red. Mód 4	6198,15	0,00	18497,24	5000,00	2620,00	0,00	32315,42

Tabla 93 Datos de experimentación sobre capacidades de los módulos

MODULO	MOD USADOS	MOD USADOS	MOD USADOS	MOD USADOS	MOD USADOS	MOD MAX
	(Inicial)	(Red. Mód.1)	(Red. Mód.2)	(Red. Mód.3)	(Red. Mód.4)	
1	4	3	4	4	4	4
2	4	4	3	4	4	4
3	4	4	4	3	3	4
4	4	4	3	3	3	4

Tabla 94 Resultados experimentación en capacidades de los módulos

Se observa que en tres de los casos se obtiene una solución que reduce además otro módulo en una unidad:

- Cuando se reduce la capacidad del módulo 2, como resultado también se puede reducir la capacidad del módulo 4
- Cuando se reduce la capacidad del módulo 3, como resultado también se puede reducir la capacidad del módulo 4
- Cuando se reduce la capacidad del módulo 4, como resultado también se puede reducir la capacidad del módulo 3, obteniendo la misma solución que el anterior
- Además se observa que en uno de los casos, cuando se reduce la capacidad del módulo 2, como resultado hay que hacer movimientos intercelulares para encontrar soluciones admisibles, elevando el valor de la función objetivo en el óptimo.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este Trabajo Fin de Máster, ha tenido como objetivo, el diseño de modelos matemáticos que describen problemas de distribución en planta con células de fabricación y máquinas reconfigurables. A partir de un estudio, metodología y experimentación a lo largo de distintos métodos matemáticos, se han obtenido diferentes conclusiones y mejoras futuras que se describirán en este capítulo.

Para alcanzar dicho objetivo, se ha realizado un estudio sobre el problema de diseño, en el cual se establece la definición principal de este objetivo: la distribución en planta, disposición de todo lo necesario para la producción de bienes o la prestación de servicios. Por otro lado, el diseño de sistemas reconfigurables, para un rápido ajuste de la capacidad productiva y de su funcionalidad, para responder a las necesidades del entorno, mediante el cambio o recolocación de los componentes. Por último, las células de fabricación, cuyo objetivo es agrupar elementos (ya sean grupo de máquinas, de productos, etc) que se fabrican de forma similar con el objetivo de minimizar los movimientos intracelular e intercelular.

Aunque se han realizado 4 modelos, el más completo sería el último, que se forma con la combinación de los restantes. A partir de los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- ✓ Con modelos sencillos, se puede establecer una visión de cómo se comporta un sistema reconfigurable con células de fabricación a través de los costes que genera.
- ✓ Por lo general, los modelos no lineales alcanzan un valor óptimo local antes que los modelos lineales pues el número de variables es menor, pero sin garantía de que sea óptimo global, que sí lo hacen los modelos lineales.
- ✓ Establecer rutas alternativas mejora la flexibilidad del sistema de producción, y puede llegar a minimizar los costes de procesado de la máquina y los movimientos entre las diferentes soluciones.
- ✓ Con costes elevados de reconfiguración (máquinas poco reconfigurables) de un periodo a otro, el modelo tiende a no cambiar la distribución, aumenta otros costes. Por tanto, los sistemas reconfigurables, con costes reducidos de reconfiguración, llevan a poder redistribuir las instalaciones entre periodos de planificación sin elevar los costes totales.
- ✓ Las máquinas reconfigurables, contienen módulos intercambiables. Se puede ajustar al máximo la cantidad disponible de dichos módulos, reduciendo así los costes de compra y mantenimiento de los mismos.

Algunos de los modelos de dos y tres periodos, no se han alcanzado soluciones óptimas por la cantidad de variables binarias, por lo que como mejoras futuras se podrían desarrollar métodos metaheurísticos en los que obtener soluciones cuasi-óptimas en tiempos razonables y poder aplicarlos a empresas reales.

Las distancias se han obtenido de forma ortogonal, pero en la realidad, no todas las industrias establecen este método. Sería interesante aplicar estos modelos (ya que no ponen restricciones sobre esto) en distribuciones con células en formas en U, por ejemplo, o las que más se utilicen en las industrias actuales.

7. BIBLIOGRAFÍA

Amine, D. and Henri, P. (2007) 'Facility Layout Problem - A survey.

Ayadehe, S. O. F. *et al.* (2010) 'Essien , A. I. Effiong, J. O.', 1, pp. 8–14.

Bortolini, M. *et al.* (2019) 'Reconfigurability in cellular manufacturing systems: a design model and multi-scenario analysis', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104(9–12), pp. 4387–4397. doi: 10.1007/s00170-019-04179-y.

Cárdenas, D. I. (2017) 'Propuesta de distribución de planta y de ambiente de trabajo para la nueva instalación de la empresa mv contrucciones ltda de la comuna de llanquihue.', *Tesis*, p. 188. Available at: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2017/bpmfcic266p/doc/bpmfcic266p.pdf>.

Chan, W. M., Chan, C. Y. and Kwong, C. K. (2004) 'Development of the MAIN algorithm for a cellular manufacturing machine layout', *International Journal of Production Research*, 42(1), pp. 51–65. doi: 10.1080/00207540310001598456.

Galán, R. *et al.* (2006) 'Diseño de Sistemas de Fabricación Reconfigurable mediante la Formación de Familias de Productos'.

García, L. (2020) 'T d o p d p m a e'.

Gómez, A. *et al.* (2003) 'Using genetic algorithms to resolve layout problems in facilities where there are aisles', *International Journal of Production Economics*, 84(3), pp. 271–282. doi: 10.1016/S0925-5273(02)00468-1.

Gómez, E. (2012) 'Metodología para la optimización de la distribución de planta de TECMO Estructuras Metálicas S.A.', *Pontificia Universidad Javeriana*, pp. 1–93.

Haddou Benderbal, H., Dahane, M. and Benyoucef, L. (2018) 'Modularity assessment in reconfigurable manufacturing system (RMS) design: an Archived Multi-Objective Simulated Annealing-based approach', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(1–4), pp. 729–749. doi: 10.1007/s00170-017-0803-2.

Heizer, J. and Render, B. (2012) *How China sees America*, *Foreign Affairs*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Khatamian, M. (2009) 'Ar of of', 6(1), pp. 187–194.

Koren, Y. *et al.* (1999) 'Reconfigurable manufacturing systems', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(2), pp. 527–540. doi: 10.1016/S0007-8506(07)63232-6.

Kouvelis, P., Chiang, W. C. and Fitzsimmons, J. (1992) 'Simulated annealing for machine layout problems in the presence of zoning constraints', *European Journal of Operational Research*, 57(2), pp. 203–223. doi: 10.1016/0377-2217(92)90043-9.

Leimkuhler, F. F. (1968) *Introduction to Operations Research, Technometrics*. doi: 10.1080/00401706.1968.10490578.

Maganha, I., Silva, C. and Ferreira, L. M. D. F. (2019) 'The layout design in reconfigurable manufacturing systems: a literature review', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer London, 105Maganha(1–4), pp. 683–700. doi: 10.1007/s00170-019-04190-3.

Masmoudi, F., Hachicha, W. and Haddar, M. (2008) 'A New Combined Framework for the Cellular Manufacturing Systems Design', (Icmeem), pp. 2–4.

Meiler, R. D. and Gau, K. Y. (1996) 'The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives', *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), pp. 351–366. doi: 10.1016/0278-6125(96)84198-7.

Meng, G., Heragu, S. S. and Zijm, H. (2004) 'Reconfigurable layout problem', *International Journal of Production Research*, 42(22), pp. 4709–4729. doi: 10.1080/0020754042000264590.

Ospina, J. (2016) 'Propuesta de distribución de planta, para aumentar la productividad en una empresa metalmeccánica en Ate Lima, Perú', *Universidad San Ignacio Loyola*, p. 113. Available at: http://repositorio.usil.edu.pe/bitstream/USIL/2470/1/2016_Ospina_Propuesta_de_distribucion_de_planta.pdf.

Pan, C., Yu, S. and Du, X. (2018) 'Optimization of warehouse layout based on genetic algorithm and simulation technique', *Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2018*. IEEE, pp. 3632–3635. doi: 10.1109/CCDC.2018.8407753.

Pattanaik, L. N., Jain, P. K. and Mehta, N. K. (2007) 'Cell formation in the presence of reconfigurable machines', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(3–4), pp. 335–345. doi: 10.1007/s00170-006-0592-5.

Romero Duque, G. A., Mejía Moncayo, C. and Torres Martínez, J. A. (2015) 'Modelos matemáticos para la definición del layout de las celdas de manufactura. Revisión de literatura', *Revista Tecnura*, 19(46), p. 135. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a11.

Rosenblatt, M. J. (1986) 'Dynamics of Plant Layout.', *Management Science*, 32(1), pp. 76–86. doi: 10.1287/mnsc.32.1.76.

Skorin (1989) 'Tabu_search_applied_to_the_quadratic_ass'.

Suresh, G. and Sahu, S. (1993) 'Multiobjective facility layout using simulated annealing'

International Journal of Production Economics, 32(2), pp. 239–254. doi: 10.1016/0925-5273(93)90071-R.

Taillard, E. (1991) 'Robust taboo search for the quadratic assignment problem', *Parallel Computing*, 17(4–5), pp. 443–455. doi: 10.1016/S0167-8191(05)80147-4.

Tam, K. (1992) 'Genetic algorithms, function optimization, and facility layout design', *European Journal of Operational Research*, 63, pp. 322–346. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221792900347>.

Tam, K. Y. (1992) 'A simulated annealing algorithm for allocating space to manufacturing cells', *International Journal of Production Research*, 30(1), pp. 63–87. doi: 10.1080/00207549208942878.

V.Madhusudanan Pillai, Irappa Basappa Hunagund (2011) 'Design of robust layout for Dynamic Plant

Layout Problems’.

Zhang, Y. and Che, A. (2014) ‘A mixed integer linear programming approach for a new form of facility layout problem’, *Proceedings - 2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2014*. IEEE, pp. 65–68. doi: 10.1109/CoDIT.2014.6996869.

I. ANEXO 1. CÓDIGOS FUENTES

En este anexo, se muestran los códigos fuentes utilizados en LINGO, que se han utilizado para resolver los casos I y II.

Caso I:

1. Modelo 1, no lineal

MODEL:

```
!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*****;
*****;
```

SETS:

```
piezas/1..3/:D;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/;;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
```

```
pieza_maq_maq(piezas,maquinas,maquinas):f;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_pieza_maq(operaciones,piezas,maquinas):a;
maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
```

ENDSETS

DATA:

D=

		250	250	350
--	--	-----	-----	-----

;

Cost_intracell=10;

Cost_intercell=25;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

a=

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	1	0	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ', s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(piezas(i):
  @for(maquinas(k):
    @for(maquinas(q):

      f(i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#size(operaciones): a(l,i,k)*a(l+1,i,q));

    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posici
ones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*x(k,s,c)*x(q,z,c)*Cost_in
tracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posici
ones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*x(k,s,c)*
x(q,z,b)*Cost_intercell))))));

Funcion_objetivo=THA+THE;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));

END

```

2. Modelo 1, lineal

MODEL:

```
!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
*****;
*****;
```

SETS:

```
piezas/1..3/:D;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/;;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
```

```
pieza_maq_maq(piezas,maquinas,maquinas):f;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_pieza_maq(operaciones,piezas,maquinas):a;
maq_cel_pos_maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones,maquinas,celulas,posiciones):z;
maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
```

ENDSETS

DATA:

D=

		250	250	350
--	--	-----	-----	-----

;

Cost_intracell=10;

Cost_intercell=25;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

a=

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	1	0	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));
```

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ', s, @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(piezas(i):
  @for(maquinas(k):
    @for(maquinas(q):

      f(i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,i,k)*a(l+1,i,q));

    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(maquinas(q):
        @for(celulas(b):
          @for(posiciones(t):
            x(k,s,c) + x(q,t,b) <= 1 + z(k,c,s,q,b,t);
          );
        );
      );
    );
  );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(t)|t#NE#s:@sum(celulas(c):D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,c,t)*z(k,c,s,q,c,t)*Cost_intra
cell)))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(t):@sum(celulas(b)|b#NE#c:D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,b,t)*z(k,c,s,q
,b,t)*Cost_intercell)))));

Funcion_objetivo=THA+THE;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));

```

```
@for (maq_cel_pos_maq_cel_pos (k, c, s, q, b, t) : @bin (z (k, c, s, q, b, t))) ;
```

```
END
```

3. Modelo 2, no lineal

```
MODEL:
```

```
!*****
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
*****
*****;
```

```
SETS:
```

```
piezas/1..3/:D;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:H,CP,CAP;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
```

```
ruta_pieza_maq_maq (rutas, piezas, maquinas, maquinas) : f;
cel_pos_cel_pos (celulas, posiciones, celulas, posiciones) : distancias;
maq_pos_cel (maquinas, posiciones, celulas) : x;
oper_ruta_pieza_maq (operaciones, rutas, piezas, maquinas) : a, p;
pieza_ruta (piezas, rutas) : y;
maq_cel_pos (maquinas, celulas, posiciones) ;
```

```
ENDSETS
```

```
DATA:
```

```
D=
```

		250	250	350
--	--	-----	-----	-----

```
;
```

```
Cost_intracell=10;
```

```
Cost_intercell=25;
```

```
CP=
```

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

```
;
```

```
H=
```

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

```
;
```

```
distancias=
```

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

```
;
```

```
a=
```

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
---	---	---	---	---

0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

p=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k),'7.2f'),@newline(1));

```



```

@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        f(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,r,i,k)*a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas;

@for(piezas(i):

  @sum(rutas(r):y(i,r))=D(i);

);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):

  CAP(k) = @sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*y(i,r)));
  CAP(k)<=H(k);

);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):y(i,r)*f(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*x(k,s,c)*x(q,z,c)*Cost_intracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):y(i,r)*f(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*x(k,s,c)*x(q,z,b)*Cost_intercell))))));

TP=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):y(i,r)*p(l,r,i,k)*CP(k))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

```

```
@for (maq_pos_cel (k, s, c) :@bin(x(k, s, c)));
```

```
END
```

4. Modelo 2, lineal

```
MODEL:
```

```
!*****;  
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA  
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS  
*****  
  
*****;
```

```
SETS:
```

```
piezas/1..3/:D;  
posiciones/1..3/;;  
maquinas/1..5/:H,CP,CAP;  
celulas/1..2/;;  
operaciones/1..3/;;  
rutas/1..2/;;
```

```
ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):f;  
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;  
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;  
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):a,p;  
pieza_ruta(piezas,rutas):y;  
maq_pos_cel_maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas):zz;  
pie_rut_maq_pos_cel_maq_pos_cel(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posicion  
es,celulas):yy;
```

```
maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
```

```
ENDSETS
```

```
DATA:
```

```
D=
```

		250	250	350
--	--	-----	-----	-----

```
;
```

```
Cost_intracell=10;
```

```
Cost_intercell=25;
```

```
CP=
```

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

```
;
```

```
H=
```

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

```
;
```

```
distancias=
```

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

```
;
```

```
a=
```

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
---	---	---	---	---

0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

p=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        f(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,r,i,k)*a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posición de cada célula, como mucho se sitúa una sola máquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada máquina se sitúa en una sola posición de una célula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas;

@for(piezas(i):

  @sum(rutas(r):y(i,r))=D(i);

);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):

  CAP(k) = @sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*y(i,r)));
  CAP(k)<=H(k);

);

@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(maquinas(q):
        @for(celulas(b):
          @for(posiciones(t):
            x(k,s,c) + x(q,t,b) <= 1 + zz(k,s,c,q,t,b);
          );
        );
      );
    );
  );
);

@for(piezas(i):

```

```

@for(rutas(r):
  @for(maquinas(k):
    @for(celulas(c):
      @for(posiciones(s):
        @for(maquinas(q):
          @for(celulas(b):
            @for(posiciones(t):
              yy(i,r,k,s,c,q,t,b) <= y(i,r) + CS * (1 -
zz(k,s,c,q,t,b));
              yy(i,r,k,s,c,q,t,b) >= y(i,r) - CS * (1 -
zz(k,s,c,q,t,b));
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,c)*Cost_intracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,b)*Cost_intercell))))));

TP=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):y(i,r)*p(l,r,i,k)*CP(k)))));

RESIDUAL_ZZ=CI*@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):zz(k,s,c,q,z,b))))));
RESIDUAL_YY=CI*@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):yy(i,r,k,s,c,q,z,b))))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP +RESIDUAL_ZZ+RESIDUAL_YY;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));
@for(maq_pos_cel_maq_pos_cel(k,s,c,q,t,b):@bin(zz(k,s,c,q,t,b)));

END

```

5. Modelo 3, no lineal

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*****;
!*****;

```

SETS:

```

piezas/1..3/:D;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:H,CAP,MNA,MAUXUSED,CP;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:TA,AL,TAUXUSED;

```

```

ruta_pieza_maq_maq(rutas, piezas, maquinas, maquinas) : f;
cel_pos_cel_pos(celulas, posiciones, celulas, posiciones) : distancias;
maq_pos_cel(maquinas, posiciones, celulas) : x;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones, rutas, piezas, maquinas) : a, p;
pieza_ruta(piezas, rutas) : y;
modulo_maq(modulos, maquinas) : w, TIMEUSED, CM;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones, rutas, piezas, modulos) : b;
maq_cel_pos(maquinas, celulas, posiciones) : ;
maq_modulo(maquinas, modulos) : ;

```

ENDSETS

DATA:

D=

		250	250	350
--	--	-----	-----	-----

;

Cost_intracell=10;

Cost_intercell=25;

CP=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

CM=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

H=

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

p=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

TA=

4	4	4	4
---	---	---	---

;

AL=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

MNA=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CI=0.000001;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('
          THA          THE          TP          TM',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 7*' ',
W(z,k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 8*' ', MAUXUSED(k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(modulos(z): 3*' ', z, 7*' ', TAUXUSED(z),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 5*' ',
@format(TIMEUSED(z,k),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        f(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,r,i,k)*a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );

```



```

);
!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;
@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;
  );
);
! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;
@for(maquinas(k):
  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;
);
! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas;
@for(piezas(i):
  @sum(rutas(r):y(i,r))=D(i);
);
! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;
@for(maquinas(k):
  CAP(k) = @sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*y(i,r))));
  CAP(k) <= H(k);
);
! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;
@for(modulos(z):
  TAUXUSED(z) = @sum(maquinas(k):w(z,k));
  TAUXUSED(z) <= TA(z);
);
! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;
@for(maquinas(k):
  MAUXUSED(k) = @sum(modulos(z):w(z,k));
  MAUXUSED(k) <= MNA(k);
);
! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;
@for(modulos(z):
  @for(maquinas(k):
    TIMEUSED(z,k) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*b(l,r,i,z)*y(i,r))));
    TIMEUSED(z,k) <= AL(z)* w(z,k);
  );
);
!Definiciones de THA y THE;
THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):y(i,r)*f(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*x(k,s,c)*x(q,z,c)*Cost_intracell))))));
THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):y(i,r)*f(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*x(k,s,c)*x(q,z,b)*Cost_intercell))))));

```

```

TP=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):y(i,r)*p(l,r,i,k)*CP(
k)))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):CM(z,k)*w(z,k)));

RESIDUAL_W=CI*@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):w(z,k)));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TM +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));
@for(modulo_maq(z,k):@gin(w(z,k)));

END

```

6. Modelo 3, lineal

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A POSICIONES DENTRO DE CÉLULA.
!*****;

```

SETS:

```

piezas/1..3/:D;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:H,CAP,MNA,MAUXUSED,CP;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:TA,AL,TAUXUSED;

```

```

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):f;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):a,p;
pieza_ruta(piezas,rutas):y;
modulo_maq(modulos,maquinas):w,TIMEUSED,CM;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):b;
maq_pos_cel_maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas):zz;
pie_rut_maq_pos_cel_maq_pos_cel(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posicion
es,celulas):yy;

```

```

maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
maq_modulo(maquinas,modulos):;

```

ENDSETS

DATA:

```

D=


|  |  |     |     |     |
|--|--|-----|-----|-----|
|  |  | 250 | 250 | 350 |
|--|--|-----|-----|-----|


;

```

```

Cost_intracell=10;
Cost_intercell=25;

```

```

CP=


|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 8 | 7 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|


;

```

```

CM=


|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |


```

220	220	220	220	220
-----	-----	-----	-----	-----

;

H=

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

p=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

TA=

4	4	4	4
---	---	---	---

;

AL=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

MNA=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TM',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));
```

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));
```

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));
```

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 7*' ',
W(z,k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 8*' ', MAUXUSED(k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(modulos(z): 3*' ', z, 7*' ', TAUXUSED(z),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 5*' ',
@format(TIMEUSED(z,k), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        f(r,i,k,q)=@sum(operaciones(1)|l#LT#@size(operaciones): a(l,r,i,k)*a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas;

@for(piezas(i):

  @sum(rutas(r):y(i,r))=D(i);

);
! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

```

```

@for (maquinas (k) :
    CAP(k) = @sum(piezas(i) : @sum(rutas(r) : @sum(operaciones(l) : p(l,r,i,k) * y(i,r))));
    CAP(k) <= H(k);
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for (modulos (z) :
    TAUXUSED(z) = @sum(maquinas(k) : w(z,k));
    TAUXUSED(z) <= TA(z);
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for (maquinas (k) :
    MAUXUSED(k) = @sum(modulos(z) : w(z,k));
    MAUXUSED(k) <= MNA(k);
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for (modulos (z) :
    @for (maquinas (k) :
        TIMEUSED(z,k) =
@sum(piezas(i) : @sum(rutas(r) : @sum(operaciones(l) : p(l,r,i,k) * b(l,r,i,z) * y(i,r))));
        TIMEUSED(z,k) <= AL(z) * w(z,k);
    );
);

@for (maquinas (k) :
    @for (celulas (c) :
        @for (posiciones (s) :
            @for (maquinas (q) :
                @for (celulas (b) :
                    @for (posiciones (t) :
                        x(k,s,c) + x(q,t,b) <= 1 + zz(k,s,c,q,t,b);
                    );
                );
            );
        );
    );
);

@for (piezas (i) :
    @for (rutas (r) :
        @for (maquinas (k) :
            @for (celulas (c) :
                @for (posiciones (s) :
                    @for (maquinas (q) :
                        @for (celulas (b) :
                            @for (posiciones (t) :
                                yy(i,r,k,s,c,q,t,b) <= y(i,r) + CS * (1 -
zz(k,s,c,q,t,b));
                                yy(i,r,k,s,c,q,t,b) >= y(i,r) - CS * (1 -
zz(k,s,c,q,t,b));
                            );
                        );
                    );
                );
            );
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

```

```

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,c)*Cost_intracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,b)*Cost_intercell))))));

TP=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):y(i,r)*p(l,r,i,k)*CP(k)))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):CM(z,k)*w(z,k)));

RESIDUAL_ZZ=CI*@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):zz(k,s,c,q,z,b))))));
RESIDUAL_YY=CI*@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):yy(i,r,k,s,c,q,z,b))))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TM +RESIDUAL_ZZ+RESIDUAL_YY;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));
@for(modulo_maq(z,k):@gin(w(z,k)));
@for(maq_pos_cel_maq_pos_cel(k,s,c,q,t,b):@bin(zz(k,s,c,q,t,b)));

END

```

7. Modelo 4, no lineal, 1 periodo

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..3/;;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..1/:coste_holding_stock;

```

```

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;

```

```

maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;
per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones):;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas):;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos):;
per_pieza(periodos,piezas):;

```

```
per_maquina(periodos,maquinas)::
per_modulo(periodos,modulos)::
```

ENDSETS

DATA:

demandas=

	250	
	250	
	350	

;

```
cost_intracell=10;
cost_intercell=25;
```

coste procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste holding stock=

	5	
--	---	--

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

	700	
	700	
	700	
	700	
	700	

;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

matriz a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
---	---	---	---	---

0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total aux=

	4		
	4		
	4		
	4		

;

aux life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

```

;
max_num_aux=


|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
|---|---|---|---|---|


;

CI=0.001;

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricaci3n de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de m3dulos usados en cada m3quina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada m3quina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los m3dulos instalados en cada m3quina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los m3dulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por m3dulos en cada m3quina
son:',@newline(1));

```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

```

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

```

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

```

!R1 En cada posición de cada célula, como mucho se sitúa una sola máquina;

```

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

```

! R2 Cada máquina se sitúa en una sola posición de una célula;

```

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);

```

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual y lo que sobra es el inventario;

```

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):
    INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
  );
);

```

```

@for(piezas(i):
  INV(i,@size(periodos))=0;
);

```

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

```

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
    CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
  );
);

```

! R5 No se puede superar el número máximo de módulos disponibles;

```

@for(modulos(z):
  @for(periodos(t):
    TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
    TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
  );
);

```

! R6 No se puede superar el número máximo de módulos en cada máquina;

```

@for (maquinas (k) :
  @for (periodos (t) :
    MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
    MAUXUSED(k,t) <= max_num_aux(k);
  );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en función de la vida útil de cada uno;

@for (modulos (z) :
  @for (maquinas (k) :
    @for (periodos (t) :
      TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t))));
      TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
    );
  );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flujos(r,i,k,q)*dis
tancias(c,s,c,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,c,t)*cost_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flu
jos(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,b,t)*cost_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,1))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*@abs(X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,1)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*@abs(W(z,
k,t)-W(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t)));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for (maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
@for (modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));

END

```

8. Modelo 4, lineal, 1 periodo

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****;
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..3/;;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..1/:coste_holding_stock;

```

```

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;
maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X,XB,XD;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,WB,WD,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;

```

```

maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):XX;

```

```

pi_ru_maq_pos_cel_maq_pos_cel_pe(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):YXX;

```

```

per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones)::;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas)::;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos)::;
per_pieza(periodos,piezas)::;
per_maquina(periodos,maquinas)::;
per_modulo(periodos,modulos)::;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

	250	
	250	
	350	

```

;
cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

```

coste_procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

```

;

```

coste holding_stock=

	5	
--	---	--

```

;
coste_relocal=

```

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

```

;

```

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

```

;

```

capac_maq=

	700	
	700	
	700	
	700	
	700	

```

;

```

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

matriz a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
---	---	---	---

1	0	0	0
0	0	0	1
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

```
;
total aux=
```

	4		
	4		
	4		
	4		

```
;
aux_life=
```

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

```
;
```

```
max_num_aux=
```

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

```
;
```

```
CS=100000;
CI=0.000001;
```

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricaci3n de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de m3dulos usados en cada m3quina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t), '7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):

```



```

        INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
    );
);

@for(piezas(i):
    INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
        CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
    );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
    @for(periodos(t):
        TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
        TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
    );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
        MAUXUSED(k,t)<= max_num_aux(k);
    );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
    @for(maquinas(k):
        @for(periodos(t):
            TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t))));
            TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):flujos(r,i,k,q)*distancias(c
,s,c,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,c,t)*cost_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):flujos(r,i,k
,q)*distancias(c,s,b,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t)*cost_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,l))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*(XB(k,s,c,t)+XD(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,l))) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*(WB(z,k,t)
)+WD(z,k,t-1))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t))));
RESIDUAL_XX=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(
posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):XX(k,s,c,q,z,b,t))))));

```

```

RESIDUAL_YXX=CI*@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t)))))))));

@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(periodos(t)|t#GT#1:
        X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1)=XB(k,s,c,t)-XD(k,s,c,t-1);
      );
    );
  );
);

@for(maquinas(k):
  @for(modulos(z):
    @for(periodos(t)|t#GT#1:
      W(z,k,t)-W(z,k,t-1)=WB(z,k,t)-WD(z,k,t-1);
    );
  );
);

@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(maquinas(q):
        @for(celulas(b):
          @for(posiciones(l):
            @for(periodos(t):
              X(k,s,c,t) + X(q,l,b,t) <= 1 +
XX(k,s,c,q,l,b,t);
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);

@for(piezas(i):
  @for(rutas(r):
    @for(maquinas(k):
      @for(celulas(c):
        @for(posiciones(s):
          @for(maquinas(q):
            @for(celulas(b):
              @for(posiciones(l):
                @for(periodos(t):
                  YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) <= Y(i,r,t) + CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
                  YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) >= Y(i,r,t) - CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
                );
              );
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W+RESIDUAL_XX+RESIDUAL_YXX;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
!@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XB(k,s,c,t)));
!@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XD(k,s,c,t)));
@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));
!@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WB(z,k,t)));
!@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WD(z,k,t)));

```

```
@for (maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(k,s,c,q,l,b,t):@bin(XX(k,s,c,q,l,b,t)));
```

```
END
```

9. Modelo 4, no lineal, 2 periodos

```
MODEL:
```

```
!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MAQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****;
*****;
```

```
SETS:
```

```
piezas/1..3/;;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..2/:coste_holding_stock;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;
maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;
per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones):;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas):;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos):;
per_pieza(periodos,piezas):;
per_maquina(periodos,maquinas):;
per_modulo(periodos,modulos):;
```

```
ENDSETS
```

```
DATA:
```

```
demandas=
```

200	250	
0	250	
400	350	

```
;
```

```
cost_intracell=10;
cost_intercell=25;
```

```
coste_procesado=
```

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

```
;
```

```
coste holding stock=
```

5	5	
---	---	--

```
;
```

```
coste_relocal=
```

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

```
;
```

```
coste_cambiomod=
```

160	160	160	160	160
-----	-----	-----	-----	-----

180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac maq=

700	700	
700	700	
700	700	
700	700	
700	700	

;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

matriz a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz_b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

; total_aux=

4	4	
4	4	
4	4	
4	4	

; aux_life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

; max_num_aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CI=0.001;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricaci3n de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3* ' ',t, 7* ' ', k, 6* ' ', z, 7*
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3* ' ',t, 6* ' ', i, 4* ' ',
@format(INV(i,t), '7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3* ' ',t, 7* ' ', k, 5* ' ',
@format(CAP(k,t), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3* ' ',t, 7* ' ', k, 8* ' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3* ' ',t, 7* ' ', z, 7* ' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3* ' ',t, 7* ' ', k, 6* ' ', z, 5*
', @format(TIMEUSED(z,k,t), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):

```

```

    @for(periodos(t):
        @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t))=1;
    );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
    @for(periodos(t):
        INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
    );
);

@for(piezas(i):
    INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
        CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
    );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
    @for(periodos(t):
        TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
        TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
    );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
        MAUXUSED(k,t)<= max_num_aux(k);
    );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
    @for(maquinas(k):
        @for(periodos(t):
            TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t))));
            TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flujos(r,i,k,q)*dis
tancias(c,s,c,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,c,t)*cost_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flu
jos(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,b,t)*cost_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,1))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*@abs(X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1))))));

```

```

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,1))) +
  @sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*@abs(W(z,
k,t)-W(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t)));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));

END

```

10. Modelo 4, lineal, 2 periodos

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****;
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..3/;;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..2/:coste_holding_stock;

```

```

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;
maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X,XB,XD;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,WB,WD,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;

```

```

maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):XX;
pi_ru_maq_pos_cel_maq_pos_cel_pe(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):YXX;
per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones):;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas):;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos):;
per_pieza(periodos,piezas):;
per_maquina(periodos,maquinas):;
per_modulo(periodos,modulos):;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

200	250	
0	250	
400	350	

;
cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

coste procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;
coste holding stock=

5	5	
---	---	--

;
coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;
coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;
capac_maq=

700	700	
700	700	
700	700	
700	700	
700	700	

;
distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;
matriz_a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;
process time=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total aux=

4	4		
4	4		
4	4		
4	4		

;

aux life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

max_num_aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):

```

```

    @for(maquinas(q):
        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));
    );
);
);
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
        @for(periodos(t):
            @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
        );
    );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
    );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
    @for(periodos(t):
        INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
    );
);

@for(piezas(i):
    INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
        CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
    );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
    @for(periodos(t):
        TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
        TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
    );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
        MAUXUSED(k,t)<= max_num_aux(k);
    );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
    @for(maquinas(k):
        @for(periodos(t):

```



```

@for (maquinas(k) :
  @for (celulas(c) :
    @for (posiciones(s) :
      @for (maquinas(q) :
        @for (celulas(b) :
          @for (posiciones(l) :
            @for (periodos(t) :
              YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) <= Y(i,r,t) + CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
              YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) >= Y(i,r,t) - CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W+RESIDUAL_XX+RESIDUAL_YXX;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for (maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
!@for (maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XB(k,s,c,t)));
!@for (maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XD(k,s,c,t)));
@for (modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));
!@for (modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WB(z,k,t)));
!@for (modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WD(z,k,t)));
@for (maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(k,s,c,q,l,b,t):@bin(XX(k,s,c,q,l,b,t)))

END

```

11. Modelo 4, no lineal, 3 periodos

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
!*****;
!*****;

```

SETS:

```

piezas/1..3/;;
posiciones/1..3/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..3/:coste_holding_stock;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;
maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;

```

```

per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones)::
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas)::
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos)::
per_pieza(periodos,piezas)::
per_maquina(periodos,maquinas)::
per_modulo(periodos,modulos)::

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

200	250	300
0	250	200
400	350	150

;

```

cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

```

coste procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste holding_stock=

5	5	5
---	---	---

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700

;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4
42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

matriz a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz_b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total aux=

4	4	4
4	4	4
4	4	4
4	4	4

;

aux life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----


```

;
max_num_aux=


|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
|---|---|---|---|---|


;
CI=0.001;

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));

```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):
    INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
  );
);

@for(piezas(i):
  INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
    CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
  );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
  @for(periodos(t):
    TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
    TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
  );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):

```

```

    @for( periodos(t) :
        MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
        MAUXUSED(k,t) <= max_num_aux(k);
    );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en función de la vida útil de cada uno;

@for(modulos(z) :
    @for(maquinas(k) :
        @for(periodos(t) :
            TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t)))));
            TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)*W(z,k,t);
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flujos(r,i,k,q)*dis
tancias(c,s,c,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,c,t)*coste_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flu
jos(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,b,t)*coste_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k)))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,l))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*@abs(X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,l)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*@abs(W(z,
k,t)-W(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t)));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));

END

```

12. Modelo 4, lineal, 3 periodos

MODEL:

```

!*****
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MAQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****
*****

```

SETS:

```

piezas/1..3/;;
posiciones/1..3/;;

```

```

maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..3/:coste_holding_stock;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;

maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X,XB,XD;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,WB,WD,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;
maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):XX;
pi_ru_maq_pos_cel_maq_pos_cel_pe(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):YXX;

per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones)::;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas)::;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos)::;
per_pieza(periodos,piezas)::;
per_maquina(periodos,maquinas)::;
per_modulo(periodos,modulos)::;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

200	250	300
0	250	200
400	350	150

;

cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

coste_procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste_holding_stock=

5	5	5
---	---	---

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700

;

distancias=

0	2	4	40	42	44
2	0	2	42	40	42
4	2	0	44	42	40
40	42	44	0	2	4

42	40	42	2	0	2
44	42	40	4	2	0

;

matriz a=

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total aux=

4	4	4
4	4	4
4	4	4
4	4	4

;

aux life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

max num aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));

```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t), '7.2f'), @newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
@for(piezas(i):
@for(maquinas(k):
@for(maquinas(q):

    flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

    );
);
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
@for(posiciones(s):
@for(periodos(t):
@sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
);
);
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
@for(periodos(t):
@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
);
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
@for(periodos(t):
INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));

```

```

    );
);

@for(piezas(i):
    INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
        CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
    );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
    @for(periodos(t):
        TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
        TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
    );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
        MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
        MAUXUSED(k,t)<= max_num_aux(k);
    );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
    @for(maquinas(k):
        @for(periodos(t):
            TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t))));
            TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):flujos(r,i,k,q)*distancias(c
,s,c,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,c,t)*cost_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):flujos(r,i,k
,q)*distancias(c,s,b,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t)*cost_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k))))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,1))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*(XB(k,s,c,t)+XD(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,1)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*(WB(z,k,t)
)+WD(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t))));
RESIDUAL_XX=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(
posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):XX(k,s,c,q,z,b,t))))));

```



```
RESIDUAL_YXX=CI*@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t))))))));
```

```
@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(periodos(t)|t#GT#1:
        X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1)=XB(k,s,c,t)-XD(k,s,c,t-1);
      );
    );
  );
);
```

```
@for(maquinas(k):
  @for(modulos(z):
    @for(periodos(t)|t#GT#1:
      W(z,k,t)-W(z,k,t-1)=WB(z,k,t)-WD(z,k,t-1);
    );
  );
);
```

```
@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(maquinas(q):
        @for(celulas(b):
          @for(posiciones(l):
            @for(periodos(t):
              X(k,s,c,t) + X(q,l,b,t) <= 1 +
XX(k,s,c,q,l,b,t);
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);
```

```
@for(piezas(i):
  @for(rutas(r):
    @for(maquinas(k):
      @for(celulas(c):
        @for(posiciones(s):
          @for(maquinas(q):
            @for(celulas(b):
              @for(posiciones(l):
                @for(periodos(t):
                  YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) <= Y(i,r,t) + CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
                  YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) >= Y(i,r,t) - CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
                );
              );
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);
```

```
Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W+RESIDUAL_XX+RESIDUAL_YXX;
```

```
! Función Objetivo;
```

```
Min=Funcion_objetivo;
```

```
! Declaración de variables;
```

```
@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
!@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XB(k,s,c,t)));
!@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XD(k,s,c,t)));
@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));
!@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WB(z,k,t)));
```

```
!@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WD(z,k,t)));
@for(maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(k,s,c,q,l,b,t):@bin(XX(k,s,c,q,l,b,t)));
```

END

Caso II:

1. Modelo 1, no lineal

MODEL:

```
!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
*****;
*****;
```

SETS:

```
piezas/1..5/:D;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/;;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
```

```
pieza_maq_maq(piezas,maquinas,maquinas):f;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_pieza_maq(operaciones,piezas,maquinas):a;
maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
```

ENDSETS

DATA:

D=

400	150	250	250	350
-----	-----	-----	-----	-----

;

```
Cost_intracell=10;
Cost_intercell=25;
```

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

a=

0	0	0	0	1
1	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

```

;

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(piezas(i):
  @for(maquinas(k):
    @for(maquinas(q):

      f(i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,i,k)*a(l+1,i,q));

    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posici
ones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*x(k,s,c)*x(q,z,c)*Cost_in
tracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posici
ones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*x(k,s,c)*
x(q,z,b)*Cost_intercell))))));

Funcion_objetivo=THA+THE;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));

END

```

2. Modelo 1, lineal

MODEL:

```
!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
*****;
*****;
```

SETS:

```
piezas/1..5/:D;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/;;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
pieza_maq_maq(piezas,maquinas,maquinas):f;

cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_pieza_maq(operaciones,piezas,maquinas):a;
maq_cel_pos_maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones,maquinas,celulas,posiciones):z;
maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
```

ENDSETS

DATA:

D=

400	150	250	250	350
-----	-----	-----	-----	-----

;

Cost_intracell=10;

Cost_intercell=25;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

a=

0	0	0	0	1
1	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(piezas(i):
  @for(maquinas(k):
    @for(maquinas(q):

      f(i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,i,k)*a(l+1,i,q));

    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;
);

@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(maquinas(q):
        @for(celulas(b):
          @for(posiciones(t):
            x(k,s,c) + x(q,t,b) <= 1 + z(k,c,s,q,b,t);
          );
        );
      );
    );
  );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(t)|t#NE#s:@sum(celulas(c):D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,c,t)*z(k,c,s,q,c,t)*Cost_intra
cell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(t):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:D(i)*f(i,k,q)*distancias(c,s,b,t)*z(k,c,s,q,b,t)*Cost_intercell))))));

Funcion_objetivo=THA+THE;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

```

```

! Declaración de variables;

@for (maq_pos_cel (k, s, c) :@bin (x (k, s, c) ));
@for (maq_cel_pos_maq_cel_pos (k, c, s, q, b, t) :@bin (z (k, c, s, q, b, t) ));

```

END

3. Modelo 2, no lineal

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*****;

```

SETS:

```

piezas/1..5/:D;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:H,CP,CAP;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;

```

```

ruta_pieza_maq_maq (rutas, piezas, maquinas, maquinas) :f;
cel_pos_cel_pos (celulas, posiciones, celulas, posiciones) :distancias;
maq_pos_cel (maquinas, posiciones, celulas) :x;
oper_ruta_pieza_maq (operaciones, rutas, piezas, maquinas) :a, p;
pieza_ruta (piezas, rutas) :y;
maq_cel_pos (maquinas, celulas, posiciones) ;;

```

ENDSETS

DATA:

D=

400	150	250	250	350
-----	-----	-----	-----	-----

;

Cost_intracell=10;
Cost_intercell=25;

CP=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

H=

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

p=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62

0	0	0.59	0	0
---	---	------	---	---

```

;

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ', s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        f(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,r,i,k)*a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;
@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas;
@for(piezas(i):

  @sum(rutas(r):y(i,r))=D(i);

);

```



```

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;
@for (maquinas (k) :
    CAP(k) = @sum(piezas(i) : @sum(rutas(r) : @sum(operaciones(l) : p(l,r,i,k) * y(i,r)))));
    CAP(k) <= H(k);
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i) : @sum(maquinas(k) : @sum(maquinas(q) | q#NE#k : @sum(posiciones(s) : @sum(posiciones(z) | z#NE#s : @sum(celulas(c) : @sum(rutas(r) : y(i,r) * f(r,i,k,q) * distancias(c,s,c,z) * x(k,s,c) * x(q,z,c) * Cost_intracell))))));

THE=@sum(piezas(i) : @sum(maquinas(k) : @sum(maquinas(q) | q#NE#k : @sum(posiciones(s) : @sum(posiciones(z) : @sum(celulas(c) : @sum(celulas(b) | b#NE#c : @sum(rutas(r) : y(i,r) * f(r,i,k,q) * distancias(c,s,b,z) * x(k,s,c) * x(q,z,b) * Cost_intercell))))));

TP=@sum(piezas(i) : @sum(maquinas(k) : @sum(rutas(r) : @sum(operaciones(l) : y(i,r) * p(l,r,i,k) * CP(k)))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for (maq_pos_cel (k,s,c) : @bin(x(k,s,c)));

END

```

4. Modelo 2, lineal

```

MODEL:

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*****;

SETS:

piezas/1..5/:D;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:H,CP,CAP;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):f;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):a,p;
pieza_ruta(piezas,rutas):y;
maq_pos_cel_maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas):zz;
pie_rut_maq_pos_cel_maq_pos_cel(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas):yy;

maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;

ENDSETS

DATA:

D=


|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 400 | 150 | 250 | 250 | 350 |
|-----|-----|-----|-----|-----|


;

```

Cost_intracell=10;
 Cost_intercell=25;

CP=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

H=

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

p=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0

0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

```

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

```

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

```



```

);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,c)*Cost_intracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,b)*Cost_intercell))))));

TP=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):y(i,r)*p(l,r,i,k)*CP(k)))));

RESIDUAL_ZZ=CI*@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):zz(k,s,c,q,z,b))))));
RESIDUAL_YY=CI*@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):yy(i,r,k,s,c,q,z,b))))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP +RESIDUAL_ZZ+RESIDUAL_YY;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));
@for(maq_pos_cel_maq_pos_cel(k,s,c,q,t,b):@bin(zz(k,s,c,q,t,b)));

END

```

5. Modelo 3, no lineal

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
*****
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..5/:D;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:H,CAP,MNA,MAUXUSED,CP;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:TA,AL,TAUXUSED;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):f;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):a,p;
pieza_ruta(piezas,rutas):y;
modulo_maq(modulos,maquinas):w,TIMEUSED,CM;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):b;
maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
maq_modulo(maquinas,modulos):;

```

ENDSETS

DATA:

```

D=


|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 400 | 150 | 250 | 250 | 350 |
|-----|-----|-----|-----|-----|


;

```

Cost_intracell=10;

Cost_intercell=25;

CP=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

CM=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

H=

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

p=

0	0	0.73	0	0
---	---	------	---	---

0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0

0	0	0	1
0	0	0	0

;

TA=

4	4	4	4
---	---	---	---

;

AL=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

MNA=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CI=0.000001;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TM',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ', s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 7*' ',
W(z,k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 8*' ', MAUXUSED(k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(modulos(z): 3*' ', z, 7*' ', TAUXUSED(z),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

```



```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 5*' ',
@format(TIMEUSED(z,k), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        f(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,r,i,k)*a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posición de cada célula, como mucho se sitúa una sola máquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada máquina se sitúa en una sola posición de una célula;

@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas;

@for(piezas(i):

  @sum(rutas(r):y(i,r))=D(i);

);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):

  CAP(k) = @sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*y(i,r)));
  CAP(k)<= H(k);

);

! R5 No se puede superar el número máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):

  TAUXUSED(z) = @sum(maquinas(k):w(z,k));
  TAUXUSED(z)<= TA(z);

);

! R6 No se puede superar el número máximo de módulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):

  MAUXUSED(k) = @sum(modulos(z):w(z,k));
  MAUXUSED(k)<= MNA(k);

);

```

```

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en función de la vida útil de cada uno;

@for(modulos(z):
  @for(maquinas(k):

    TIMEUSED(z,k) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*b(l,r,i,z)*y(i,r)))));
    TIMEUSED(z,k) <= AL(z) * w(z,k);
  );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):y(i,r)*f(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*x(k,s,c)*x(q,z,c)*Cost_intracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):y(i,r)*f(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*x(k,s,c)*x(q,z,b)*Cost_intercell))))));

TP=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):y(i,r)*p(l,r,i,k)*CP(k)))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):CM(z,k)*w(z,k)));

RESIDUAL_W=CI*@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):w(z,k)));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TM +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel(k,s,c):@bin(x(k,s,c)));
@for(modulo_maq(z,k):@gin(w(z,k)));

END

```

6. Modelo 3, lineal

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A POSICIONES DENTRO DE CADA CÉLULA.
!*****;
!*****;

```

SETS:

```

piezas/1..5/:D;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:H,CAP,MNA,MAUXUSED,CP;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:TA,AL,TAUXUSED;

```

```

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):f;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas):x;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):a,p;
pieza_ruta(piezas,rutas):y;
modulo_maq(modulos,maquinas):w,TIMEUSED,CM;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):b;
maq_pos_cel_maq_pos_cel(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas):zz;
pie_rut_maq_pos_cel_maq_pos_cel(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas):yy;

```

```

maq_cel_pos(maquinas,celulas,posiciones):;
maq_modulo(maquinas,modulos):;

```

ENDSETS

DATA:

D=

400	150	250	250	350
-----	-----	-----	-----	-----

;

Cost_intracell=10;

Cost_intercell=25;

CP=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

CM=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

H=

700	700	700	700	700
-----	-----	-----	-----	-----

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1

0	0	1	0	0
---	---	---	---	---

;

p=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

TA=

4	4	4	4
---	---	---	---

;

AL=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

MNA=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TM',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_cel_pos(k,c,s)|X(k,s,c)#EQ#1: 3*' ', k, 6*' ', c,
8*' ', s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(pieza_ruta(i,r): 3*' ', i, 4*' ', r, 4*' ',
@format(Y(i,r),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 7*' ',
W(z,k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maquinas(k): 3*' ', k, 8*' ', MAUXUSED(k),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(modulos(z): 3*' ', z, 7*' ', TAUXUSED(z),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(maq_modulo(k,z): 3*' ', k, 6*' ', z, 5*' ',
@format(TIMEUSED(z,k), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;
@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        f(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones): a(l,r,i,k)*a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posición de cada célula, como mucho se sitúa una sola máquina;
@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):

    @sum(maquinas(k):x(k,s,c))<=1;

  );
);

! R2 Cada máquina se sitúa en una sola posición de una célula;
@for(maquinas(k):

  @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):x(k,s,c)))=1;

);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas;
@for(piezas(i):

  @sum(rutas(r):y(i,r))=D(i);

);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;
@for(maquinas(k):

  CAP(k) = @sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*y(i,r)));
  CAP(k)<= H(k);

);

! R5 No se puede superar el número máximo de módulos disponibles;
@for(modulos(z):

  TAUXUSED(z) = @sum(maquinas(k):w(z,k));
  TAUXUSED(z)<= TA(z);

);

! R6 No se puede superar el número máximo de módulos en cada máquina;
@for(maquinas(k):

```

```

    MAUXUSED(k) = @sum(modulos(z):w(z,k));
    MAUXUSED(k) <= MNA(k);

);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en función de la vida útil de cada uno;

@for(modulos(z):
    @for(maquinas(k):

        TIMEUSED(z,k) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):p(l,r,i,k)*b(l,r,i,z)*y(i,r))));
        TIMEUSED(z,k) <= AL(z)*w(z,k);
    );
);

@for(maquinas(k):
    @for(celulas(c):
        @for(posiciones(s):
            @for(maquinas(q):
                @for(celulas(b):
                    @for(posiciones(t):
                        x(k,s,c) + x(q,t,b) <= 1 + zz(k,s,c,q,t,b);
                    );
                );
            );
        );
    );
);

@for(piezas(i):
    @for(rutas(r):
        @for(maquinas(k):
            @for(celulas(c):
                @for(posiciones(s):
                    @for(maquinas(q):
                        @for(celulas(b):
                            @for(posiciones(t):
                                yy(i,r,k,s,c,q,t,b) <= y(i,r) + CS * (1 -
zz(k,s,c,q,t,b));
                                yy(i,r,k,s,c,q,t,b) >= y(i,r) - CS * (1 -
zz(k,s,c,q,t,b));
                            );
                        );
                    );
                );
            );
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,c)*Cost_intracell))))));

THE=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):f(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*yy(i,r,k,s,c,q,z,b)*Cost_intercell))))));

TP=@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):y(i,r)*p(l,r,i,k)*CP(k))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):CM(z,k)*w(z,k));

RESIDUAL_ZZ=CI*@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):zz(k,s,c,q,z,b))))));
RESIDUAL_YY=CI*@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):yy(i,r,k,s,c,q,z,b))))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TM +RESIDUAL_ZZ+RESIDUAL_YY;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

```

```

! Declaración de variables;

@for (maq_pos_cel (k, s, c) : @bin (x (k, s, c) ));
@for (modulo_maq (z, k) : @gin (w (z, k) ));
@for (maq_pos_cel_maq_pos_cel (k, s, c, q, t, b) : @bin (zz (k, s, c, q, t, b) ));

END

```

7. Modelo 4, no lineal, 1 periodo

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..5/;;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..1/:coste_holding_stock;

ruta_pieza_maq_maq (rutas, piezas, maquinas, maquinas) : flujos;
cel_pos_cel_pos (celulas, posiciones, celulas, posiciones) : distancias;
oper_ruta_pieza_maq (operaciones, rutas, piezas, maquinas) : matriz_a, process_time;
modulo_maq (modulos, maquinas) : coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo (operaciones, rutas, piezas, modulos) : matriz_b;
pieza_periodo (piezas, periodos) : demandas;
modulo_periodo (modulos, periodos) : total_aux, TAUXUSED;
maq_periodo (maquinas, periodos) : capac_maq, CAP, MAUXUSED;

maq_pos_cel_per (maquinas, posiciones, celulas, periodos) : X;
pieza_ruta_per (piezas, rutas, periodos) : Y;
modulo_maq_per (modulos, maquinas, periodos) : W, TIMEUSED;
pieza_per (piezas, periodos) : INV;

per_maq_cel_pos (periodos, maquinas, celulas, posiciones) ;;
per_pieza_ruta (periodos, piezas, rutas) ;;
per_maq_modulo (periodos, maquinas, modulos) ;;
per_pieza (periodos, piezas) ;;
per_maquina (periodos, maquinas) ;;
per_modulo (periodos, modulos) ;;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

	400	
	150	
	250	
	250	
	350	

;

```

cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

```

coste_procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste holding stock=

	5	
--	---	--

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

	700	
	700	
	700	
	700	
	700	

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

matriz a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total aux=

	4	
	4	
	4	
	4	

;

aux_life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

max_num_aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CI=0.001;

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricaci3n de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de m3dulos usados en cada m3quina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada m3quina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));

```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3* ' ',t, 7* ' ', k, 5* ' ',
@format(CAP(k,t), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3* ' ',t, 7* ' ', k, 8* ' ',
MAUXUSED(k,t), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3* ' ',t, 7* ' ', z, 7* ' ',
TAUXUSED(z,t), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----', @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3* ' ',t, 7* ' ', k, 6* ' ', z, 5*
', @format(TIMEUSED(z,k,t), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
@for(piezas(i):
@for(maquinas(k):
@for(maquinas(q):

flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

);
);
);
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
@for(posiciones(s):
@for(periodos(t):
@sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
);
);
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
@for(periodos(t):
@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
);
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
@for(periodos(t):
INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
);
);

@for(piezas(i):
INV(i,@size(periodos))=0;
);

```

```

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t)))));
    CAP(k,t) <= capac_maq(k,t);
  );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
  @for(periodos(t):
    TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
    TAUXUSED(z,t) <= total_aux(z,t);
  );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
    MAUXUSED(k,t) <= max_num_aux(k);
  );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
  @for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
      TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y(i,r,t)))));
      TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
    );
  );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flujos(r,i,k,q)*dis
tancias(c,s,c,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,c,t)*cost_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flu
jos(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,b,t)*cost_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k)))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,l))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*@abs(X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,l)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*@abs(W(z,
k,t)-W(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t)));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));

```

END

8. Modelo 4, lineal, 1 periodo

MODEL:

```
!*****;  
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA  
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS  
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES  
!*CON VARIOS PERIODOS  
*****  
  
*****;
```

SETS:

```
piezas/1..5/;;  
posiciones/1..4/;;  
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;  
celulas/1..2/;;  
operaciones/1..3/;;  
rutas/1..2/;;  
modulos/1..4/:aux_life;  
periodos/1..1/:coste_holding_stock;  
  
ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;  
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;  
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;  
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;  
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;  
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;  
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;  
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;  
  
maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X,XB,XD;  
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;  
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,WB,WD,TIMEUSED;  
pieza_per(piezas,periodos):INV;  
maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):XX;  
pi_ru_maq_pos_cel_maq_pos_cel_pe(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):YXX;  
  
per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones):;  
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas):;  
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos):;  
per_pieza(periodos,piezas):;  
per_maq_maq(periodos,maquinas):;  
per_modulo(periodos,modulos):;
```

ENDSETS

DATA:

demandas=

	400	
	150	
	250	
	250	
	350	

;

```
cost_intracell=10;  
cost_intercell=25;
```

coste procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste holding_stock=

	5	
--	---	--

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

	700	
	700	
	700	
	700	
	700	

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

matriz_a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process_time=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0

0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	0	0
---	---	---	---

;

total aux=

	4	
	4	
	4	
	4	

;

aux life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

max_num aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t), '7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):
    INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
  );
);

@for(piezas(i):
  INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):

```

```

CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t)))));
CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
);
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
@for(periodos(t):
TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
);
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
@for(periodos(t):
MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
MAUXUSED(k,t)<= max_num_aux(k);
);
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
@for(maquinas(k):
@for(periodos(t):
TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t)))));
TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z) * W(z,k,t);
);
);
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):flujos(r,i,k,q)*distancias(c
,s,c,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,c,t)*cost_intracell))))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):flujos(r,i,k
,q)*distancias(c,s,b,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t)*cost_intercell))))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k))))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,l))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*(XB(k,s,c,t)+XD(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,l)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*(WB(z,k,t
)+WD(z,k,t-1))))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t)));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t)));
RESIDUAL_XX=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(
posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):XX(k,s,c,q,z,b,t))))));
RESIDUAL_YXX=CI*@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(pos
iciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):YXX(i,r,k,s,c,
q,z,b,t))))))));

@for(maquinas(k):
@for(celulas(c):
@for(posiciones(s):
@for(periodos(t)|t#GT#1:
X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1)=XB(k,s,c,t)-XD(k,s,c,t-1);
);
);
);

```

```

);
@for (maquinas(k) :
  @for (modulos(z) :
    @for (periodos(t) | t#GT#1 :
      W(z,k,t)-W(z,k,t-1)=WB(z,k,t)-WD(z,k,t-1);
    );
  );
);
@for (maquinas(k) :
  @for (celulas(c) :
    @for (posiciones(s) :
      @for (maquinas(q) :
        @for (celulas(b) :
          @for (posiciones(l) :
            @for (periodos(t) :
              X(k,s,c,t) + X(q,l,b,t) <= 1 +
XX(k,s,c,q,l,b,t);
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);
@for (piezas(i) :
  @for (rutas(r) :
    @for (maquinas(k) :
      @for (celulas(c) :
        @for (posiciones(s) :
          @for (maquinas(q) :
            @for (celulas(b) :
              @for (posiciones(l) :
                @for (periodos(t) :
                  YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) <= Y(i,r,t) + CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
                  YXX(i,r,k,s,c,q,l,b,t) >= Y(i,r,t) - CS *
(1 - XX(k,s,c,q,l,b,t));
                );
              );
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);
Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W+RESIDUAL_XX+RESIDUAL_YXX;
! Función Objetivo;
Min=Funcion_objetivo;
! Declaración de variables;
@for (maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
!@for (maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XB(k,s,c,t)));
!@for (maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(XD(k,s,c,t)));
@for (modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));
!@for (modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WB(z,k,t)));
!@for (modulo_maq_per(z,k,t):@gin(WD(z,k,t)));
@for (maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(k,s,c,q,l,b,t):@bin(XX(k,s,c,q,l,b,t)));

END

```

9. Modelo 4, no lineal, 2 periodos

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA

```

```

!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MAQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..5/;;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..2/:coste_holding_stock;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;

maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;
per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones):;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas):;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos):;
per_pieza(periodos,piezas):;
per_maq(maquinas,periodos):;
per_modulo(periodos,modulos):;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

300	400	
350	150	
200	250	
0	250	
400	350	

;

cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

coste_procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste_holding_stock=

5	5	
---	---	--

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

700	700	
700	700	
700	700	
700	700	

700	700	
-----	-----	--

; distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

; matriz a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

; process time=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
---	---	---	------	---

0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total_aux=

4	4	
4	4	
4	4	
4	4	

;

aux_life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

max_num_aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

```

;

CI=0.001;

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));

```



```

@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):
    INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
  );
);

@for(piezas(i):
  INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t)));
    CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
  );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
  @for(periodos(t):
    TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
    TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
  );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));

```

```

        MAUXUSED(k,t) <= max_num_aux(k);
    );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en función de la vida útil de cada uno;

@for(modulos(z):
    @for(maquinas(k):
        @for(periodos(t):
            TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t)))));
            TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flujos(r,i,k,q)*dis
tancias(c,s,c,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,c,t)*coste_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flu
jos(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,b,t)*coste_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k)))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,l))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*@abs(X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,l)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*@abs(W(z,
k,t)-W(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t)));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t)));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));

END

```

10. Modelo 4, lineal, 2 periodos

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****;
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..5/;;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;

```

```

operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..2/:coste_holding_stock;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;

maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X,XB,XD;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,WB,WD,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;
maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):XX;
pi_ru_maq_pos_cel_maq_pos_cel_pe(piezas,rutas,maquinas,posiciones,celulas,maquinas,posiciones,celulas,periodos):YXX;

per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones)::;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas)::;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos)::;
per_pieza(periodos,piezas)::;
per_maq(maquinas,periodos)::;
per_modulo(periodos,modulos)::;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

300	400	
350	150	
200	250	
0	250	
400	350	

;

cost_intracell=10;

cost_intercell=25;

coste_procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste holding_stock=

5	5	
---	---	--

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

700	700	
700	700	
700	700	
700	700	
700	700	

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

matriz a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
---	---	---	------	---

0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total aux=

4	4	
4	4	
4	4	
4	4	

;

aux life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

max num aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

```

;

CS=100000;
CI=0.000001;

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3* ',t, 7*
', k, 6* ', c, 8* ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3* ',t, 6* ', i, 4* ', r, 4*
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3* ',t, 7* ', k, 6* ', z, 7*
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3* ',t, 6* ', i, 4* ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3* ',t, 7* ', k, 5* ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3* ',t, 7* ', k, 8* ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3* ',t, 7* ', z, 7* ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----');

```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t), '7.2f'), @newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(l)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);
!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);
! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);
! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):
    INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
  );
);
@for(piezas(i):
  INV(i,@size(periodos))=0;
);
! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
    CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
  );
);
! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
  @for(periodos(t):
    Tauxused(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
    Tauxused(z,t)<= total_aux(z,t);
  );
);
! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));

```

```

        MAUXUSED(k,t) <= max_num_aux(k);
    );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
    @for(maquinas(k):
        @for(periodos(t):
            TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t)))));
            TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
        );
    );
);

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):flujos(r,i,k,q)*distancias(c
,s,c,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,c,t)*cost_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posicion
es(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):flujos(r,i,k
,q)*distancias(c,s,b,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t)*cost_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,
r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k)))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,l))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_r
elocal(k)*(XB(k,s,c,t)+XD(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,l)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*(WB(z,k,t)
)+WD(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t)));
RESIDUAL_XX=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(
posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):XX(k,s,c,q,z,b,t))))));
RESIDUAL_YXX=CI*@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(pos
iciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):YXX(i,r,k,s,c,
q,z,b,t)))))))));

@for(maquinas(k):
    @for(celulas(c):
        @for(posiciones(s):
            @for(periodos(t)|t#GT#1:
                X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1)=XB(k,s,c,t)-XD(k,s,c,t-1);
            );
        );
    );
);

@for(maquinas(k):
    @for(modulos(z):
        @for(periodos(t)|t#GT#1:
            W(z,k,t)-W(z,k,t-1)=WB(z,k,t)-WD(z,k,t-1);
        );
    );
);

@for(maquinas(k):
    @for(celulas(c):
        @for(posiciones(s):
            @for(maquinas(q):
                @for(celulas(b):
                    @for(posiciones(l):
                        @for(periodos(t):
                            X(k,s,c,t) + X(q,l,b,t) <= 1 +
XX(k,s,c,q,l,b,t);
                    );
                );
            );
        );
    );
);

```



```

oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;

maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;

per_maq_cel_pos(periodos,maquinas,celulas,posiciones)::;
per_pieza_ruta(periodos,piezas,rutas)::;
per_maq_modulo(periodos,maquinas,modulos)::;
per_pieza(periodos,piezas)::;
per_maquina(periodos,maquinas)::;
per_modulo(periodos,modulos)::;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

300	400	200
350	150	0
200	250	300
0	250	200
400	350	150

;

```

cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

```

coste procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste holding stock=

5	5	5
---	---	---

;

coste_relocal=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste_cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac_maq=

700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

matriz_a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0

0	1	0	0	0
---	---	---	---	---

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz_b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

; total_aux=

4	4	4
4	4	4
4	4	4
4	4	4

; aux_life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

; max_num_aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

; CI=0.001;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(HE,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TP,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TR,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TM,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(TI,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(1)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

```

```

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):
    INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
  );
);

@for(piezas(i):
  INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
    CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
  );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
  @for(periodos(t):
    TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
    TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
  );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
    MAUXUSED(k,t)<= max_num_aux(k);
  );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
  @for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
      TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t))));
      TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z)* W(z,k,t);
    );
  );
);

!Definiciones de THA y THE;

```

```

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flujos(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,c,t)*cost_intracell))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):Y(i,r,t)*flujos(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*X(k,s,c,t)*X(q,z,b,t)*cost_intercell))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k)))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,1))) +
0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*@abs(X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,1)) +
@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*@abs(W(z,k,t)-W(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t)));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t))));

Funcion_objetivo=THA+THE+TP+TR+TM+TI +RESIDUAL_W;

! Función Objetivo;

Min=Funcion_objetivo;

! Declaración de variables;

@for(maq_pos_cel_per(k,s,c,t):@bin(X(k,s,c,t)));
@for(modulo_maq_per(z,k,t):@gin(W(z,k,t)));

END

```

12. Modelo 4, lineal, 3 periodos

MODEL:

```

!*****;
!*ASIGNACIÓN DE MÁQUINAS A LOCALIZACIONES DENTRO DE CADA CÉLULA
!*CON RUTAS ALTERNATIVAS
!*CON MÁQUINAS RECONFIGURABLES
!*CON VARIOS PERIODOS
*****;
*****;

```

SETS:

```

piezas/1..5/;;
posiciones/1..4/;;
maquinas/1..5/:max_num_aux,coste_relocal,coste_procesado;
celulas/1..2/;;
operaciones/1..3/;;
rutas/1..2/;;
modulos/1..4/:aux_life;
periodos/1..3/:coste_holding_stock;

ruta_pieza_maq_maq(rutas,piezas,maquinas,maquinas):flujos;
cel_pos_cel_pos(celulas,posiciones,celulas,posiciones):distancias;
oper_ruta_pieza_maq(operaciones,rutas,piezas,maquinas):matriz_a,process_time;
modulo_maq(modulos,maquinas):coste_cambiomod;
oper_ruta_pieza_modulo(operaciones,rutas,piezas,modulos):matriz_b;
pieza_periodo(piezas,periodos):demandas;
modulo_periodo(modulos,periodos):total_aux,TAUXUSED;
maq_periodo(maquinas,periodos):capac_maq,CAP,MAUXUSED;

maq_pos_cel_per(maquinas,posiciones,celulas,periodos):X,XB,XD;
pieza_ruta_per(piezas,rutas,periodos):Y;
modulo_maq_per(modulos,maquinas,periodos):W,WB,WD,TIMEUSED;
pieza_per(piezas,periodos):INV;

```

```

maq_pos_cel_maq_pos_cel_per(maquinas, posiciones, celulas, maquinas, posiciones, celulas, periodos):XX;
pi_ru_maq_pos_cel_maq_pos_cel_pe(piezas, rutas, maquinas, posiciones, celulas, maquinas, posiciones, celulas, periodos):YXX;

```

```

per_maq_cel_pos(periodos, maquinas, celulas, posiciones)::;
per_pieza_ruta(periodos, piezas, rutas)::;
per_maq_modulo(periodos, maquinas, modulos)::;
per_pieza(periodos, piezas)::;
per_maquina(periodos, maquinas)::;
per_modulo(periodos, modulos)::;

```

ENDSETS

DATA:

demandas=

300	400	200
350	150	0
200	250	300
0	250	200
400	350	150

;

```

cost_intracell=10;
cost_intercell=25;

```

coste procesado=

8	7	5	6	7
---	---	---	---	---

;

coste holding stock=

5	5	5
---	---	---

;

coste relocar=

900	1100	1000	800	1200
-----	------	------	-----	------

;

coste cambiomod=

160	160	160	160	160
180	180	180	180	180
200	200	200	200	200
220	220	220	220	220

;

capac maq=

700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700
700	700	700

;

distancias=

0	2	4	6	40	42	44	46
2	0	2	4	42	40	42	44
4	2	0	2	44	42	40	42
6	4	2	0	46	44	42	40
40	42	44	46	0	2	4	6
42	40	42	44	2	0	2	4
44	42	40	42	4	2	0	2
46	44	42	40	6	4	2	0

;

matriz a=

0	0	1	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	0
0	0	0	0	1

0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0

0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	0	1	0	0

0	0	1	0	0
0	0	0	0	1
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0

;

process time=

0	0	0.73	0	0
0.76	0	0	0	0
0	0.99	0	0	0
0.49	0	0	0	0
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0	0.54
0	0	0	0.8	0
0	0	0	0.14	0
0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0.12

0	0.49	0	0	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0.67	0	0
0	0	0	0.26	0

0	0	0	0.63	0
0.65	0	0	0	0
0	0	0.57	0	0
0	0	0	0	0.67
0	0.4	0	0	0

0	0	0	0.46	0
0.39	0	0	0	0
0.46	0	0	0	0
0	0.74	0	0	0
0	0	0.59	0	0

0	0	0.44	0	0
0	0	0	0	0.93
0	0.33	0	0	0
0	0	0	0	0.62
0	0	0.59	0	0

;

matriz_b=

1	0	0	0
1	0	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	1	0
1	0	0	0

0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	1

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	1	0	0
0	0	0	1

0	0	1	0
0	0	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	1	0	0

0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	0	1
0	0	0	0

;

total aux=

4	4	4
4	4	4
4	4	4
4	4	4

;

aux life=

300	300	300	300
-----	-----	-----	-----

;

max num aux=

4	4	4	4	4
---	---	---	---	---

;

CS=100000;
CI=0.000001;

```
@text('layoutCRMS.txt')=@write('La funcion objetivo del problema es:
',Funcion_objetivo,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('          THA          THE          TP          TR          TM
TI',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----
-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@format(THA,'10.2f'),' ');
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));
```

```

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La asignacion de maquinas a posiciones en celulas
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA CELULA POSICION',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_cel_pos(t,k,c,s)|X(k,s,c,t)#EQ#1: 3*' ',t, 7*'
', k, 6*' ', c, 8*' ',s,@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La fabricación de piezas por cada ruta es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA RUTA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza_ruta(t,i,r): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ', r, 4*'
', @format(Y(i,r,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('El numero de módulos usados en cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 7*'
', W(z,k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los inventarios de piezas son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO PIEZA CANTIDAD',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_pieza(t,i): 3*' ',t, 6*' ', i, 4*' ',
@format(INV(i,t),'7.2f'),@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('La capacidad en horas usadas de cada máquina
es:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 5*' ',
@format(CAP(k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en cada máquina son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maquina(t,k): 3*' ',t, 7*' ', k, 8*' ',
MAUXUSED(k,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los módulos instalados en el sistema son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MODULO MOD_USADOS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_modulo(t,z): 3*' ',t, 7*' ', z, 7*' ',
TAUXUSED(z,t),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

@text('layoutCRMS.txt')=@write('Los tiempos usados por módulos en cada máquina
son:',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('PERIODO MAQUINA MODULO HORAS_USADAS',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write('-----',@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@writefor(per_maq_modulo(t,k,z): 3*' ',t, 7*' ', k, 6*' ', z, 5*'
', @format(TIMEUSED(z,k,t),'7.2f'),@newline(1));
@text('layoutCRMS.txt')=@write(@newline(1));

ENDDATA

!R0 Cálculo del flujo de movimientos entre máquinas a partir de las operaciones;

@for(rutas(r):
  @for(piezas(i):
    @for(maquinas(k):
      @for(maquinas(q):

        flujos(r,i,k,q)=@sum(operaciones(1)|l#LT#@size(operaciones):
matriz_a(l,r,i,k)*matriz_a(l+1,r,i,q));

      );
    );
  );
);

```

```

!R1 En cada posicion de cada celula, como mucho se situa una sola maquina;

@for(celulas(c):
  @for(posiciones(s):
    @for(periodos(t):
      @sum(maquinas(k):X(k,s,c,t))<=1;
    );
  );
);

! R2 Cada maquina se situa en una sola posicion de una celula;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    @sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):X(k,s,c,t)))=1;
  );
);

! R3 La demanda de cada parte se reparte entre las rutas de los periodos previos y actual
y lo que sobra es el inventario;

@for(piezas(i):
  @for(periodos(t):
    INV(i,t)=@sum(periodos(j)|j#LE#t:@sum(rutas(r):Y(i,r,j)))-
@sum(periodos(j)|j#LE#t:demandas(i,j));
  );
);

@for(piezas(i):
  INV(i,@size(periodos))=0;
);

! R4 No se puede superar la capacidad de cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    CAP(k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*Y(i,r,t))));
    CAP(k,t)<= capac_maq(k,t);
  );
);

! R5 No se puede superar el numero máximo de módulos disponibles;

@for(modulos(z):
  @for(periodos(t):
    TAUXUSED(z,t) = @sum(maquinas(k):W(z,k,t));
    TAUXUSED(z,t)<= total_aux(z,t);
  );
);

! R6 No se puede superar el numero maximo de modulos en cada máquina;

@for(maquinas(k):
  @for(periodos(t):
    MAUXUSED(k,t) = @sum(modulos(z):W(z,k,t));
    MAUXUSED(k,t)<= max_num_aux(k);
  );
);

! R7 Se fija el número de módulos mínimos en funcion de la vida util de cada uno;

@for(modulos(z):
  @for(maquinas(k):
    @for(periodos(t):
      TIMEUSED(z,k,t) =
@sum(piezas(i):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):process_time(l,r,i,k)*matriz_b(l,r,i,z)*Y
(i,r,t))));
      TIMEUSED(z,k,t) <= aux_life(z) * W(z,k,t);
    );
  );
);

```

!Definiciones de THA y THE;

THA=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z)|z#NE#s:@sum(celulas(c):@sum(rutas(r):flujos(r,i,k,q)*distancias(c,s,c,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,c,t)*cost_intracell))))))));

THE=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q)|q#NE#k:@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b)|b#NE#c:@sum(rutas(r):flujos(r,i,k,q)*distancias(c,s,b,z)*YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t)*cost_intercell))))))));

TP=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(rutas(r):@sum(operaciones(l):Y(i,r,t)*process_time(l,r,i,k)*coste_procesado(k))))));

TR=@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*X(k,s,c,l))) + 0.5*@sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(celulas(c):@sum(posiciones(s):coste_relocal(k)*(XB(k,s,c,t)+XD(k,s,c,t-1))))));

TM=@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*W(z,k,l)) + @sum(periodos(t)|t#GT#1:@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):coste_cambiomod(z,k)*(WB(z,k,t)+WD(z,k,t-1)))));

TI=@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):coste_holding_stock(t)*INV(i,t)));

RESIDUAL_W=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(modulos(z):W(z,k,t))));

RESIDUAL_XX=CI*@sum(periodos(t):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):XX(k,s,c,q,z,b,t))))))));

RESIDUAL_YXX=CI*@sum(periodos(t):@sum(piezas(i):@sum(maquinas(k):@sum(maquinas(q):@sum(posiciones(s):@sum(posiciones(z):@sum(celulas(c):@sum(celulas(b):@sum(rutas(r):YXX(i,r,k,s,c,q,z,b,t))))))));

```
@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(periodos(t)|t#GT#1:
        X(k,s,c,t)-X(k,s,c,t-1)=XB(k,s,c,t)-XD(k,s,c,t-1);
      );
    );
  );
);
```

```
@for(maquinas(k):
  @for(modulos(z):
    @for(periodos(t)|t#GT#1:
      W(z,k,t)-W(z,k,t-1)=WB(z,k,t)-WD(z,k,t-1);
    );
  );
);
```

```
@for(maquinas(k):
  @for(celulas(c):
    @for(posiciones(s):
      @for(maquinas(q):
        @for(celulas(b):
          @for(posiciones(l):
            @for(periodos(t):
              X(k,s,c,t) + X(q,l,b,t) <= 1 +
XX(k,s,c,q,l,b,t);
            );
          );
        );
      );
    );
  );
);
```

```
@for(piezas(i):
  @for(rutas(r):
    @for(maquinas(k):
      @for(celulas(c):
        @for(posiciones(s):
          @for(maquinas(q):
            @for(celulas(b):
              @for(posiciones(l):
                @for(periodos(t):
```


II. ANEXO 2. HOJAS DE RESULTADOS

Caso I:

1. Modelo 1, no lineal

Caso:	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	1		1

Modelo	1	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	33
No lineales	24
Binarias	30

Restricciones	
Total	15
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:00:03

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
29000	250000					279000

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	1
3	2	3
4	2	2
5	1	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

2. Modelo 1, lineal

Caso:	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	1		1

Modelo	1	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	933
No lineales	0
Binarias	930

Restricciones	
Total	915
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:00:00

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
29000	250000					279000

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	1
2	1	1
3	1	3
4	1	2
5	2	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

3. Modelo 2, no lineal

Caso:	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2		1

Modelo	2	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	45
No lineales	36
Binarias	30

Restricciones	
Total	29
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:00:04

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
31000	262500	6991				300491

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	1
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	2	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250
3	1	350
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	222,50	700
3	349,00	700
4	238,50	700
5	322,50	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

4. Modelo 2, lineal

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2		1

Modelo	2	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	6397
No lineales	0
Binarias	930

Restricciones	
Total	11731
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:01:14

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
29000	250000	6991				285991

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	3
2	2	3
3	2	1
4	2	2
5	1	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	222,50	700
3	349,00	700
4	238,50	700
5	322,50	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

5. Modelo 3, no lineal

Caso:	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	1

Modelo	3	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	96
No lineales	36
Binarias	50

Restricciones	
Total	89
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:00:09

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
29000	250000	6991		1760		287751

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	1	1
3	1	3
4	1	2
5	2	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250
3	1	350
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	222,50	700
3	349,00	700
4	238,50	700
5	322,50	700

PERIODO 2		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	2	4
4	3	4
5	2	4

PERIODO 2		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Módulos usados en sistema

PERIODO 1		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4

PERIODO 2		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	140,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	206,50	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	35,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	91,00	300
5	1	0,00	0
	2	167,50	300
	3	0,00	0
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

6. Modelo 3, lineal

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	1

Modelo	3	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	6397
No lineales	0
Binarias	950

Restricciones	
Total	11790
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:02:38

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
29000	250000	6991		1760		287751

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	1
3	2	3
4	2	2
5	1	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250
3	1	350
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	222,50	700
3	349,00	700
4	238,50	700
5	322,50	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	2	4
4	3	4
5	2	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Módulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	140,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	206,50	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	35,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	91,00	300
5	1	0,00	0
	2	167,50	300
	3	0,00	0
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

7. Modelo 4, no lineal, 1 periodo

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	3

Modelo	4	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	97
No lineales	36
Binarias	50

Restricciones	
Total	90
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:01:14

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
290000	250000	6991	5000	1760	0	553751

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	3
3	2	1
4	2	2
5	1	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250
3	1	350
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	222,50	700
3	349,00	700
4	238,50	700
5	322,50	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	2	4
4	3	4
5	2	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	140,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	206,50	0
	4	142,50	300
4	1	35,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	91,00	300
5	1	0,00	0
	2	167,00	300
	3	0,00	0
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
2	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
3	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
4	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
5	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
2	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
3	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
4	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
5	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0

8. Modelo 4, lineal, 1 periodo

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	1

Modelo	4	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	6499
No lineales	0
Binarias	950

Restricciones	
Total	11792
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:03:52

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
29000	250000	6991	5000	1760	0	292751

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	3
2	2	1
3	2	3
4	2	2
5	1	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	250
2	1	0
	2	250
3	1	350
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	222,50	700
3	349,00	700
4	238,50	700
5	322,50	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	2	4
4	3	4
5	2	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Módulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	140,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	206,50	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	35,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	91,00	300
5	1	0,00	0
	2	167,00	300
	3	0,00	0
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

9. Modelo 4, no lineal, 2 periodos

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	2

Modelo	4	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	191
No lineales	112
Binarias	100

Restricciones	
Total	173
No lineales	4

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:18:07

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
62000	0	11115	5800	2540	3000	84455

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	3
3	2	1
4	2	2
5	1	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	3
3	2	1
4	1	3
5	1	2

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	450
2	1	0
	2	0
3	1	750
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
2	1	0
	2	250
3	1	0
	2	0

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	2
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	0
	4	1
5	1	0
	2	0
	3	0
	4	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	2
	3	0
	4	0
4	1	0
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1	
PIEZA	CANTIDAD
1	250
2	0
3	350

PERIODO 2	
PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0

PERIODO 3	
PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	448,50	700
3	699,00	700
4	258,00	700
5	0,00	700

PERIODO 2		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	0,00	700
3	0,00	700
4	112,50	700
5	322,50	700

PERIODO 3		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	3	4
4	2	4
5	0	4

PERIODO 2		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	2	4
4	1	4
5	2	4

PERIODO 3		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Módulos usados en sistema

PERIODO 1		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	1	4
4	2	4

PERIODO 2		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	4	4
3	2	4
4	1	4

PERIODO 3		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1			
MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	148,50	300
	3	300,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	442,50	600
	3	0,00	0
	4	256,50	300
4	1	63,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	195,00	300
5	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0

PERIODO 2			
MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	0,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	0,00	600
	3	0,00	0
	4	0,00	0
4	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	0,00	0
5	1	0,00	0
	2	167,50	300
	3	0,00	0
	4	155,00	300

PERIODO 3			
MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

10. Modelo 4, lineal, 2 periodos

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	2

Modelo	4	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	12993
No lineales	0
Binarias	1900

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

12:55:31

Estado

Feasible

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
57000	0	12980	7700	2100	1750	81530

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	2
2	2	1
3	2	3
4	2	2
5	1	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	2	1
3	2	2
4	1	2
5	1	1

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	200
2	1	0
	2	0
3	1	750
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	250
	2	0
2	1	0
	2	250
3	1	0
	2	0

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	2
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	0
	4	1
5	1	0
	2	0
	3	0
	4	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	2
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	350

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	366,00	700
3	556,00	700
4	223,00	700
5	0,00	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	115,00	700
2	247,00	700
3	142,50	700
4	112,50	700
5	322,50	700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	3	4
4	2	4
5	0	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	2	4
3	3	4
4	3	4
5	2	4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	1	4
4	2	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	2	4
2	4	4
3	2	4
4	3	4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	66,00	300
	3	300,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	442,50	600
	3	0,00	0
	4	114,00	300
4	1	28,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	195,00	300
5	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	115,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	247,50	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	0,00	600
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	0,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	0,00	300
5	1	0,00	0
	2	167,50	300
	3	0,00	0
	4	155,00	300

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

11. Modelo 4, no lineal, 3 periodos

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	3

Modelo	4	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	284
No lineales	168
Binarias	150

Restricciones	
Total	255
No lineales	4

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:10:55

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
84000	450000	15709	8700	2740	4750	565899

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	1	1
3	1	2
4	2	2
5	1	3

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	1
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	2	3

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	1
2	1	1
3	1	2
4	2	2
5	2	3

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	200
2	1	0
	2	0
3	1	0
	2	900

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	550
2	1	0
	2	250
3	1	0
	2	0

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
2	1	0
	2	200
3	1	0
	2	0

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	0
	4	2
3	1	0
	2	0
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	0
	4	0
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	0
	4	0
3	1	0
	2	0
	3	0
	4	2
4	1	0
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	0
	4	0
3	1	0
	2	0
	3	0
	4	2
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	0
	2	1
	3	0
	4	1

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	500

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	300
2	0
3	150

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	426,00	700
3	645,00	700
4	28,00	700
5	108,00	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	181,50	700
3	313,50	700
4	189,50	700
5	322,50	700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	0,00	700
3	0,00	700
4	90,00	700
5	258,00	700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	3	4
3	1	4
4	1	4
5	1	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	1	4
3	2	4
4	2	4
5	2	4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	1	4
3	2	4
4	1	4
5	2	4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	2	4
2	1	4
3	0	4
4	3	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	2	4
3	1	4
4	3	4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	1	4
4	3	4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	66,00	300
	3	0,00	0
	4	360,00	600
3	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	114,00	300
4	1	28,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
5	1	108,00	0
	2	0,00	300
	3	0,00	0
	4	0,00	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	181,50	300
	3	0,00	0
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	313,50	600
4	1	77,00	0
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	0,00	0
5	1	0,00	0
	2	167,50	300
	3	0,00	0
	4	155,00	300

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	0,00	0
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	600
4	1	0,00	300
	2	0,00	0
	3	90,00	300
	4	0,00	0
5	1	0,00	0
	2	134,00	300
	3	0,00	0
	4	124,00	300

12. Modelo 4, lineal, 3 periodos

Caso	1					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
3	5	2	3	2	4	3

Modelo	4	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	19486
No lineales	0
Binarias	2850

Restricciones	
Total	35457
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

04:17:33

Estado

Feasible

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
87303,9	411101,69	1643,.51	11300	2920	6301,14	518926,73

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	1	3
3	1	2
4	1	1
5	2	2

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	2	2
3	2	1
4	1	3
5	1	1

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	2	2
3	1	1
4	1	3
5	1	2

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	701
2	1	0
	2	0
3	1	508
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	48
	2	0
2	1	0
	2	450
3	1	0
	2	391

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
2	1	0
	2	0
3	1	0
	2	0

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	2
4	1	1
	2	0
	3	0
	4	1
5	1	0
	2	0
	3	0
	4	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	2
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	1
	2	2
	3	0
	4	1

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	0
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	2
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	1
	2	2
	3	0
	4	1

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	501
2	0
3	108

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	300
2	200
3	150

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	434,97	700
3	700,00	700
4	230,45	700
5	0,00	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	22,19	700
2	204,37	700
3	258,50	700
4	202,50	700
5	627,48	700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	0,00	700
3	0,00	700
4	0,00	700
5	0,00	700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	0	4
2	2	4
3	3	4
4	2	4
5	0	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	3	4
4	2	4
5	4	4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	3	4
3	3	4
4	2	4
5	4	4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	2	4
3	1	4
4	3	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	2	4
4	4	4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	2	4
4	4	4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	231,58	300
	3	203,39	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	0
	2	300,00	300
	3	0,00	0
	4	400,00	600
4	1	98,25	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	132,20	300
5	1	0,00	0
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	22,19	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	47,76	300
	4	156,61	300
3	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	0,00	0
	4	27,50	600
4	1	0,00	300
	2	0,00	0
	3	202,50	300
	4	0,00	0
5	1	46,98	300
	2	301,50	600
	3	0,00	0
	4	279,00	300

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	0,00	300
	4	0,00	300
3	1	0,00	0
	2	0,00	300
	3	0,00	0
	4	0,00	600
4	1	0,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	300
	4	0,00	0
5	1	0,00	300
	2	0,00	600
	3	0,00	0
	4	0,00	300

Caso II:

1. Modelo 1, no lineal

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	1		1

Modelo	1	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	43
No lineales	32
Binarias	40

Restricciones	
Total	17
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:00:26

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
52000	0					52000

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	2
2	2	4
3	2	3
4	2	2
5	2	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

2. Modelo 1, lineal

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	1		1

Modelo	1	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	1643
No lineales	0
Binarias	1640

Restricciones	
Total	1617
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:00:01

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
52000	0					52000

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	4
3	2	3
4	2	2
5	2	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

3. Modelo 2, no lineal

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	1

Modelo	2	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	59
No lineales	49
Binarias	40

Restricciones	
Total	33
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:00:46

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
52000	0	13055				65055

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	2
2	2	4
3	2	3
4	2	2
5	2	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	350
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	222,50	700
3	525,00	700
4	490,50	700
5	538,50	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

4. Modelo 2, lineal

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2		1

Modelo	2	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	17661
No lineales	0
Binarias	1640

Restricciones	
Total	33635
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:08:59

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
52000	0	13055				65055

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	2
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	350
	2	0

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	222,50	700
3	525,00	700
4	490,50	700
5	538,50	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

5. Modelo 3, no lineal

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	

Modelo	3	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	110
No lineales	49
Binarias	60

Restricciones	
Total	93
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:03:16

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
54796,6	0	12954,32		2880		70630,92

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	4
2	2	4
3	2	3
4	2	2
5	2	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	139,83

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	222,50	700
3	525,00	700
4	454,14	700
5	555,28	700

PERIODO 2		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3		
MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4
5	4	4

PERIODO 2		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3		
MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	4	4
4	4	4

PERIODO 2		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3		
MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	58,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	84,07	300
	4	55,93	300
3	1	0,00	0
	2	300,00	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	287,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	54,64	300
5	1	16,78	300
	2	167,50	300
	3	216,00	300
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

6. Modelo 3, lineal

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	

Modelo	3	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	17711
No lineales	0
Binarias	1660

Restricciones	
Total	33694
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:08:35

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
54796,61	0	12954,32		2880		70630,93

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	3
2	2	4
3	2	3
4	2	2
5	2	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	139,83

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	222,50	700
3	525,00	700
4	454,14	700
5	555,28	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4
5	4	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Módulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	4	4
4	4	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	58,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	84,07	300
	4	55,93	300
3	1	0,00	0
	2	300,00	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	287,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	54,64	300
5	1	16,78	300
	2	167,50	300
	3	216,00	300
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

7. Modelo 4, no lineal, 1 periodo

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	1

Modelo	4	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	111
No lineales	49
Binarias	60

Restricciones	
Total	94
No lineales	2

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:05:21

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
54796,61	0	12954,32	5000	2880	0	75630,93

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	3
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210,17
	2	139,89

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	222,50	700
3	525,00	700
4	454,14	700
5	555,28	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4
5	4	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Módulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	4	4
4	4	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	58,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	84,07	300
	4	55,93	300
3	1	0,00	0
	2	300,00	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	287,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	54,64	300
5	1	16,78	300
	2	167,50	300
	3	216,00	300
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
2	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
3	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
4	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
5	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
2	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
3	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
4	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
5	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0

8. Modelo 4, lineal, 1 periodo

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	

Modelo	4	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	17833
No lineales	0
Binarias	1660

Restricciones	
Total	33696
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

00:16:14

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
54796,61	0	12954,32	5000	2880	0	75630,93

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	4
2	1	4
3	1	3
4	1	2
5	1	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	210
	2	139

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	222,50	700
3	525,00	700
4	454,14	700
5	555,28	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	2	4
4	3	4
5	4	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	4	4
4	4	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	58,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	84,07	300
	4	55,93	300
3	1	0,00	0
	2	300,00	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	287,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	54,64	300
5	1	16,78	300
	2	167,50	300
	3	216,00	300
	4	155,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

9. Modelo 4, no lineal, 2 periodos

Restricciones

Total	181
No lineales	4

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

09:08:21

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
89559,32	0	24723,14	6900	3840	1110,17	126132,63

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	3
3	2	2
4	2	1
5	2	4

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	1
2	2	1
3	2	2
4	2	3
5	2	4

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	300
	2	0
2	1	350
	2	0
3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	622,03

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	127,97
	2	0

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	0
	4	2
3	1	1
	2	2
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	1
	2	0
	3	0
	4	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	1
3	1	1
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	222,03

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	630,00	700
2	461,81	700
3	700,00	700
4	166,00	700
5	74,64	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	133,69	700
3	394,00	700
4	432,77	700
5	538,50	700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	4	4
4	2	4
5	1	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	3	4
4	3	4
5	4	4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	4	4
3	2	4
4	3	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	4	4
3	4	4
4	4	4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	266,00	300
	2	227,50	300
	3	136,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	66,00	300
	3	0,00	0
	4	395,81	600
3	1	219,00	300
	2	0,00	600
	3	0,00	0
	4	114,00	300
4	1	28,00	300
	2	0,00	0
	3	138,00	300
	4	0,00	0
5	1	74,64	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	58,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	51,19	300
	4	0,00	300
3	1	0,00	300
	2	251,50	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	287,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	33,27	300
5	1	0,00	300
	2	167,50	300
	3	216,00	300
	4	155,00	300

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
2	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
3	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
4	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
5	1		0
	2		0
	3		0
	4		0

10. Modelo 4, lineal, 2 periodos

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	2

Modelo	4	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	35663
No lineales	0
Binarias	3320

Restricciones	
Total	67443
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

21:45:48

Estado

Global Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
93000	0	24607	10000	2460	1750	131817

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	2
2	2	3
3	2	2
4	2	1
5	2	4

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	2
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1		
2		
3		
4		
5		

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	300
2	1	350
	2	0
3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	750

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	0
	2	0

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	
	2	
2	1	
	2	
3	1	
	2	
4	1	
	2	
5	1	
	2	

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	0
	4	0
5	1	1
	2	0
	3	1
	4	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
3	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	
	2	
	3	
	4	
2	1	
	2	
	3	
	4	
3	1	
	2	
	3	
	4	
4	1	
	2	
	3	
	4	
5	1	
	2	
	3	
	4	

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	350

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	
2	
3	
4	
5	

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	630,00	700
2	366,00	700
3	688,50	700
4	217,00	700
5	252,00	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	82,50	700
3	318,50	700
4	399,50	700
5	538,50	700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1		700
2		700
3		700
4		700
5		700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	2	4
3	2	4
4	1	4
5	2	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	2	4
3	2	4
4	2	4
5	4	4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4
5		4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	2	4
4	2	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	3	4
4	3	4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1		4
2		4
3		4
4		4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	266,00	300
	2	227,50	300
	3	136,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	66,00	300
	3	0,00	0
	4	300,00	300
3	1	0,00	0
	2	132,00	300
	3	0,00	0
	4	114,00	300
4	1	217,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
5	1	90,00	300
	2	0,00	0
	3	162,00	300
	4	0,00	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	58,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	0,00	0
	4	0,00	300
3	1	0,00	0
	2	176,00	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	287,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	0,00	0
5	1	0,00	300
	2	167,50	300
	3	216,00	300
	4	155,00	300

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
2	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
3	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
4	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0
5	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
	4	0	0

11. Modelo 4, no lineal, 3 periodos

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	4

Modelo	4	NO LINEAL
--------	---	-----------

Variables	
Total	330
No lineales	207
Binarias	180

Restricciones	
Total	267
No lineales	4

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

01:19:40

Estado

Local Opt

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
122559,32	0	31917,64	9100	3700	1110,17	168387,13

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	2
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	1	1

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	2
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	2
2	1	1
3	1	2
4	1	3
5	1	4

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	300
	2	0
2	1	350
	2	0
3	1	0
	2	200
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	622

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	400
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	250
4	1	0
	2	250
5	1	127
	2	0

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	200
2	1	0
	2	0
3	1	0
	2	300
4	1	0
	2	200
5	1	150
	2	0

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	2
3	1	1
	2	0
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	0
5	1	1
	2	0
	3	0
	4	1

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	1
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	1
	4	0
3	1	1
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	1
	4	1
5	1	1
	2	1
	3	1
	4	1

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	222

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	630,00	700
2	461,81	700
3	700,00	700
4	166,00	700
5	74,64	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	270,00	700
2	133,69	700
3	394,00	700
4	432,77	700
5	538,50	700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	0,00	700
2	159,00	700
3	347,50	700
4	297,00	700
5	366,00	700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	2	4
4	2	4
5	2	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	2	4
3	3	4
4	3	4
5	4	4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	2	4
3	3	4
4	3	4
5	4	4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	2	4
3	3	4
4	4	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	4	4
3	4	4
4	3	4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	4	4
3	4	4
4	3	4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	266,00	300
	2	227,50	300
	3	136,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	66,00	300
	3	0,00	300
	4	395,81	600
3	1	219,00	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	114,00	300
4	1	28,00	300
	2	0,00	0
	3	138,00	300
	4	0,00	0
5	1	74,64	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	300

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	58,50	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	82,50	300
	3	51,19	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	300
	2	251,50	300
	3	0,00	0
	4	142,50	300
4	1	287,00	300
	2	0,00	0
	3	112,50	300
	4	33,27	300
5	1	0,00	300
	2	167,50	300
	3	216,00	300
	4	155,00	300

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	300
	2	0,00	300
	3	0,00	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	99,00	300
	3	60,00	300
	4	0,00	0
3	1	0,00	300
	2	176,50	300
	3	0,00	0
	4	171,00	300
4	1	168,00	300
	2	0,00	0
	3	90,00	300
	4	39,00	300
5	1	0,00	300
	2	134,00	300
	3	108,00	300
	4	124,00	300

12. Modelo 4, lineal, 3 periodos

Caso	2					
Nº Piezas	Nº Máquinas	Nº Células	Nº Pos/Cél	Nº Rutas/Pieza	Nº Módulos	Nº Periodos
5	5	2	4	2	4	4

Modelo	4	LINEAL
--------	---	--------

Variables	
Total	53492
No lineales	0
Binarias	4980

Restricciones	
Total	101189
No lineales	0

Tiempo de computación (hh:mm:ss)

04:03:38

Estado

Feasible

Función objetivo

THA	THE	TP	TR	TM	TI	TOTAL
227722,11	1554318,34	33061,93	12800	4240	4005,74	1836148,12

Asignación de máquinas a posiciones de células (X)

PERIODO 1

MAQ	CELULA	POSIC
1	2	1
2	1	2
3	1	4
4	1	1
5	1	3

PERIODO 2

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	2
2	1	1
3	1	4
4	1	3
5	2	4

PERIODO 3

MAQ	CELULA	POSIC
1	1	4
2	1	2
3	2	2
4	2	3
5	2	4

Fabricación de piezas por ruta (Y)

PERIODO 1

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	587,94
2	1	0
	2	350
3	1	0
	2	282,46
4	1	0
	2	0
5	1	0
	2	475,09

PERIODO 2

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	112,06
2	1	150
	2	0
3	1	0
	2	175,44
4	1	447,76
	2	0
5	1	424,91
	2	0

PERIODO 3

PIEZA	RUTA	CANTIDAD
1	1	0
	2	200
2	1	0
	2	0
3	1	0
	2	292,11
4	1	2,24
	2	0
5	1	0
	2	0

Módulos usados por máquina (W)

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	0
	2	1
	3	0
	4	0
2	1	0
	2	1
	3	0
	4	1
3	1	0
	2	2
	3	0
	4	1
4	1	2
	2	0
	3	0
	4	1
5	1	2
	2	0
	3	2
	4	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	2
	3	1
	4	1
3	1	1
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	0
	4	1
5	1	1
	2	0
	3	2
	4	0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	CANTIDAD
1	1	1
	2	1
	3	1
	4	0
2	1	0
	2	2
	3	0
	4	1
3	1	1
	2	1
	3	0
	4	1
4	1	1
	2	0
	3	0
	4	0
5	1	1
	2	0
	3	2
	4	0

Inventarios de piezas

PERIODO 1

PIEZA	CANTIDAD
1	287
2	0
3	82
4	0
5	75

PERIODO 2

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	7
4	197
5	150

PERIODO 3

PIEZA	CANTIDAD
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

Análisis de Restricciones

Capacidades de las máquinas (horas)

PERIODO 1

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	227,50	700
2	283,25	700
3	700,00	700
4	689,95	700
5	700,00	700

PERIODO 2

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	489,40	700
2	559,20	700
3	700,00	700
4	205,63	700
5	60,51	700

PERIODO 3

MAQ	HORAS USAD	CAPACIDAD
1	1,10	700
2	98,05	700
3	256,00	700
4	166,89	700
5	108,00	700

Módulos en cada máquina

PERIODO 1

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	1	4
2	2	4
3	3	4
4	3	4
5	4	4

PERIODO 2

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	4	4
3	3	4
4	2	4
5	3	4

PERIODO 3

MAQ	MOD USADOS	MOD MAX
1	3	4
2	3	4
3	3	4
4	1	4
5	3	4

Modulos usados en sistema

PERIODO 1

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	4	4
3	2	4
4	3	4

PERIODO 2

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	4	4
3	4	4
4	3	4

PERIODO 3

MODULO	MOD USADOS	MOD MAX
1	4	4
2	4	4
3	3	4
4	2	4

Tiempo usado por módulos en cada máquina

VIDA UTIL	300	300	300	300
-----------	-----	-----	-----	-----

PERIODO 1

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	0
	2	227,50	300
	3	0,00	0
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	93,21	300
	3	0,00	0
	4	190,04	300
3	1	0,00	0
	2	258,69	600
	3	0,00	0
	4	161,00	300
4	1	409,95	600
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	280,00	300
5	1	382,51	600
	2	0,00	0
	3	317,49	600
	4	0,00	0

PERIODO 2

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	114,00	300
	2	97,50	300
	3	277,90	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	389,24	600
	3	169,36	300
	4	0,00	300
3	1	300,00	300
	2	300,00	300
	3	0,00	0
	4	100,00	300
4	1	95,16	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	110,48	300
5	1	0,00	300
	2	0,00	0
	3	60,51	600
	4	0,00	0

PERIODO 3

MAQUINA	MODULO	TIEMPO US	TIEMPO MAX
1	1	0,00	300
	2	0,00	300
	3	1,10	300
	4	0,00	0
2	1	0,00	0
	2	98,05	600
	3	0,00	0
	4	0,00	300
3	1	1,50	300
	2	88,00	300
	3	0,00	0
	4	166,50	300
4	1	166,89	300
	2	0,00	0
	3	0,00	0
	4	0,00	0
5	1	0,00	300
	2	0,00	0
	3	108,00	600
	4	0,00	0