

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ASIGNACIÓN DE TRABAJO DE ENSAMBLADO A TÉCNICOS CON
CAPACIDADES VARIADAS EN UN AMBIENTE MULTIPRODUCTO POR
LOTES

TESIS PRESENTADA POR

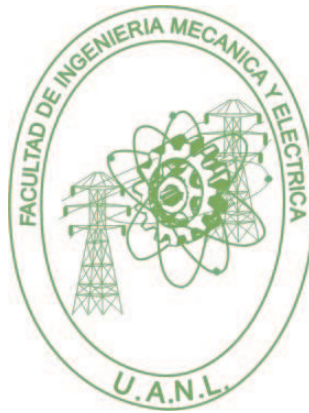
KARLA VIOLETA MARTÍNEZ FACUNDO

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MAYO DE 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ASIGNACIÓN DE TRABAJO DE ENSAMBLADO A TÉCNICOS CON
CAPACIDADES VARIADAS EN UN AMBIENTE MULTIPRODUCTO POR
LOTES

TESIS PRESENTADA POR

KARLA VIOLETA MARTÍNEZ FACUNDO

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MAYO DE 2008

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis “ASIGNACIÓN DE TRABAJO DE ENSAMBLADO A TÉCNICOS CON CAPACIDADES VARIADAS EN UN AMBIENTE MULTIPRODUCTO POR LOTES”, realizada por el alumno KARLA VIOLETA MARTÍNEZ FACUNDO, con número de matrícula 1102680, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de tesis

Dr. Óscar Leonel Chacón Mondragón
Asesor

Dr. José Arturo Berrones Santos
Revisor

Dr. César Emilio Villarreal Rodríguez
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Posgrado

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo con mi más sincero amor, admiración y respeto a mis padres: María Clariza Facundo Rivas y Eugenio Martínez Lara, que con su sacrificio, paciencia y ternura han sabido guiarme por el buen camino.

A mis hermanos Carlos, Aby y Juan Ángel por su alegría, cariño y entusiasmo. Y especialmente al Ing. Nestor Praxedis Maldonado Gómez por estar a mi lado, por apoyarme e impulsarme a seguir adelante y por el inmenso amor que nos une.

AGRADECIMIENTOS

Deseo antes que nada agradecer a Dios por permitirme lograr mis metas.

Al CONACYT por el apoyo económico durante mi maestría.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Óscar Chacón Mondragón, asesor de mi tesis, gracias por todo su apoyo y colaboración durante el desarrollo de este trabajo; igualmente agradezco al Dr. Arturo Berrones Santos y al Dr. César E. Villarreal por aceptar ser mis revisores y por sus comentarios y aportaciones a este trabajo de tesis. Asimismo, hago extensivo mi agradecimiento al Dr. Igor Litvinchev, por su ayuda y por confiar en mí. Además quiero agradecer al M. C. Marco Antonio Huerta por su disposición y ayuda.

Igualmente, deseo agradecer a toda mi familia por su apoyo y por pasar a mi lado las angustias, preocupaciones y alegrías que implicó el hacer este trabajo.

Quiero manifestar un agradecimiento especial a todos los doctores y amigos de PISIS por sus buenos deseos, amistad y cariño que me ofrecen, principalmente a mis amigas Anel, Herizet, Enid y Xochitl, con las cuales compartí momentos muy importantes durante mi maestría. Gracias a todas aquellas personas que han estado a mi lado y que de una u otra manera me animaron y ayudaron a concluir este trabajo exitosamente.

A todos, infinitamente gracias.

RESUMEN

Karla Violeta Martínez Facundo

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Título del estudio:

**ASIGNACIÓN DE TRABAJO DE ENSAMBLADO A TÉCNICOS
CON CAPACIDADES VARIADAS EN UN AMBIENTE
MULTIPRODUCTO POR LOTES**

Número de páginas: 148

Objetivos y método de estudio:

El presente trabajo se enfoca en un problema de asignación de tareas en un sistema de producción de una compañía ensambladora de computadoras y equipos periféricos.

La forma de operación actual reparte los trabajos conforme se van desocupando los operadores, los artículos a ensamblar viajan a través de la banda transportadora hacia alguna estación de trabajo que tenga algún espacio disponible, cada estación tiene una área de trabajo que es donde se está ensamblando el trabajo actual y

una área de espera que es donde el próximo trabajo a ensamblar espera hasta ser ensamblado.

Debido a la forma de operación actual, aquellos operadores que se encuentran en las primeras estaciones de trabajo son los que reciben un mayor número de artículos a ensamblar. Además, si en la asignación de tareas todas las estaciones de trabajo tienen sus dos áreas ocupadas, la orden que no encontró lugar para ser ensamblada se regresa a la entrada de la banda transportadora, lo que ocasiona retardos y desorden en los pedidos.

El objetivo principal de este trabajo es construir un modelo matemático que nos permita distribuir los artículos a los operadores minimizando el total de tiempo trabajado, utilizando información sobre sus habilidades y capacidades para ensamblar las distintas clases de artículos, así como satisfacer los requerimientos necesarios en la línea de ensamblaje, tales como el balanceo de la carga de trabajo.

Contribuciones y conclusiones:

El problema de asignación se trató desde diversas perspectivas, primeramente se plantea un Problema de Asignación Clásico ya que se desea minimizar el tiempo total de trabajo; sin embargo estas soluciones traen como consecuencia un desequilibrio en la carga de trabajo entre los operadores. Se propone después utilizar el Problema de Asignación de Cuello de Botella con el cual se logra un balanceo en carga de trabajo, pero este método requiere demasiado tiempo de cómputo para encontrar una solución; para obtener soluciones con una carga de trabajo balanceada y que se obtengan con tiempos de cómputo aceptables, se propone el uso de cotas para los tiempos esperados de ensamblado por operador.

FIRMA DEL ASESOR:_____

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Resumen	V
Índice general	VII
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivo de la tesis	5
1.3. Importancia del trabajo	5
1.4. Alcance	6
1.5. Estructura de la tesis	7
2. Marco teórico	8
2.1. Optimización	8
2.2. Problemas de asignación con una tarea por agente	12
2.2.1. Problema de asignación clásico	13
2.2.2. Problema de asignación clásico considerando la calidad de los agentes	14
2.2.3. Problema de semi-asignación	15

2.2.4.	Problema de asignación de cuello de botella	16
2.2.5.	Problema de asignación balanceada	17
2.3.	Problemas de asignación con múltiples tareas por agente	17
2.3.1.	Problema de asignación generalizada	17
2.3.2.	Problema de asignación generalizada de cuello de botella	18
2.3.3.	Problema de asignación minimizando el tiempo de desequilibrio	19
2.4.	Análisis de diferentes casos	20
2.5.	Programación de tareas	21
2.5.1.	Modelos característicos de la programación de tareas	23
2.5.2.	Configuración de las máquinas	24
2.5.3.	Reglas de despacho	27
2.5.4.	Programación de sistemas de ensamblaje flexibles	30
2.6.	Analogías	32
3.	El problema y sus antecedentes	35
3.1.	Sistemas multiagentes para la optimización de producción utilizando algoritmos genéticos	35
3.1.1.	Solución propuesta	36
3.1.2.	Interacciones de agentes	38
3.2.	Conclusiones	40
4.	Metodología propuesta	41
4.1.	Descripción de la metodología	41
4.2.	Estudio del sistema actual	42
4.3.	Problema de asignación clásico	43
4.4.	Problema de asignación de cuello de botella (BAP)	45
4.5.	Problema de asignación con cotas	48
4.5.1.	Cotas mediante distribución hipergeométrica multivariada . . .	49
4.5.2.	Cotas mediante S^m y S^M	53

5. Experimentación computacional	56
5.1. Descripción de ejemplos	56
5.2. Descripción de los programas utilizados	59
5.2.1. Representación del sistema actual	60
5.2.2. Solución del problema de asignación	64
5.2.3. Solución del BAP	67
5.2.4. Solución del problema de asignación con cotas	68
6. Resultados y conclusiones	69
6.1. Análisis de resultados	69
6.2. Conclusiones	72
6.3. Contribución	75
6.4. Trabajo futuro	76
A. Tablas de datos	78
B. Resultados	96
C. Gráficas	100
Bibliografía	147
Ficha autobiográfica	148

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Diseño de la línea de producción	2
1.2. Estaciones de trabajo	3
2.1. Funciones convexas	11
2.2. Función no convexa	11
2.3. Modelo flexible de producción en serie	25
2.4. Modelo sobre pedido	26
4.1. Diagrama de la metodología	41
4.2. Ejemplo de una simulación del sistema actual	42
4.3. Ejemplo de una asignación clásica	44
4.4. Visualización gráfica del minmax ℓ_∞	47
4.5. Ejemplo de una asignación de cuello de botella	48
4.6. Ejemplo de una asignación con cotas	55
5.1. Archivo de entrada para <code>simulación.cpp</code>	61
5.2. Asignación del primer lote	63
5.3. Asignación del segundo lote	64
5.4. Reporte1 de salida	64
5.5. Reporte2 de salida	65
5.6. Archivo de entrada para GAMS	66
5.7. Archivo de entrada para CPLEX	67
C.1. e0510-1	100
C.2. e0510-2	101

C.3. e0510-3	102
C.4. e0510-4	103
C.5. e0510-5	104
C.6. e1010-1	105
C.7. e1010-2	106
C.8. e1010-3	107
C.9. e1010-4	108
C.10.e1010-5	109
C.11.r40801-1	111
C.12.r40801-2	113
C.13.r40801-3	115
C.14.r40802-1	117
C.15.r40802-2	119
C.16.r40802-3	121
C.17.r40803-1	123
C.18.r40803-2	125
C.19.r40803-3	127
C.20.r40804-1	129
C.21.r40804-2	131
C.22.r40804-3	133
C.23.r40805-1	135
C.24.r40805-2	137
C.25.r40805-3	139
C.26.r40806-1	141
C.27.r40806-2	143
C.28.r40806-3	145

ÍNDICE DE TABLAS

5.1. Algoritmo de <code>simulación.cpp</code>	62
6.1. Resultados de r40801-1	70
6.2. Comparación de métodos	74
A.1. Proporciones e0510-1	78
A.2. Proporciones e0510-2	78
A.3. Proporciones e0510-3	79
A.4. Proporciones e0510-4	79
A.5. Proporciones e0510-5	79
A.6. Proporciones e1010-1 y e1010-2	79
A.7. Proporciones e1010-3	80
A.8. Proporciones e1010-4	80
A.9. Proporciones e1010-5	80
A.10.Proporciones r40801-1	81
A.11.Proporciones r40801-2	82
A.12.Proporciones r40801-3	83
A.13.Proporciones r40802-1	84
A.14.Proporciones r40802-2	85
A.15.Proporciones r40802-3	86
A.16.Proporciones r40803-1, r40803-2 y r40803-3	87
A.17.Proporciones r40804-1	88
A.18.Proporciones r40804-2	89
A.19.Proporciones r40804-3	90

A.20.Proporciones r40805-1	91
A.21.Proporciones r40805-2	92
A.22.Proporciones r40805-3	93
A.23.Proporciones r40806-1, r40806-2 y r40806-3	94
A.24.Medias de artículos por clase	95
B.1. Resultados de r40801-1	96
B.2. Resultados de r40801-2	96
B.3. Resultados de r40801-3	96
B.4. Resultados de r40802-1	97
B.5. Resultados de r40802-2	97
B.6. Resultados de r40802-3	97
B.7. Resultados de r40803-1	97
B.8. Resultados de r40803-2	97
B.9. Resultados de r40803-3	98
B.10.Resultados de r40806-1	98
B.11.Resultados de r40806-2	98
B.12.Resultados de r40806-3	98
B.13.Resultados de las instancias de una sola clase por lote	99
C.1. Resultados r40801-1	110
C.2. Resultados r40801-2	112
C.3. Resultados r40801-3	114
C.4. Resultados r40802-1	116
C.5. Resultados r40802-2	118
C.6. Resultados r40802-3	120
C.7. Resultados r40803-1	122
C.8. Resultados r40803-2	124
C.9. Resultados r40803-3	126
C.10.Resultados r40804-1	128

C.11.Resultados r40804-2	130
C.12.Resultados r40804-3	132
C.13.Resultados r40805-1	134
C.14.Resultados r40805-2	136
C.15.Resultados r40805-3	138
C.16.Resultados r40806-1	140
C.17.Resultados r40806-2	142
C.18.Resultados r40806-3	144

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el área de Investigación de Operaciones el problema de asignación está caracterizado por la búsqueda de la mejor distribución de trabajos o tareas, a diversos operadores o máquinas, y que se realice satisfaciendo un conjunto dado de restricciones.

A continuación se describe el problema que vamos a abordar a lo largo del presente trabajo.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El sistema de producción actual, objeto de nuestro estudio, se realiza en una compañía ensambladora de computadoras y equipos periféricos. Un modelo gráfico simplificado de la línea de producción bajo estudio se muestra en la figura 1.1 y su operación se describe a continuación:

El trabajo de ensamblaje está contenido en bandejas que consisten en todas las partes requeridas para ensamblar una computadora o equipo periférico solicitado según la preferencia del cliente.

Hay r diferentes tipos de trabajos (aprox. 40) y llegan uno a la vez a la línea

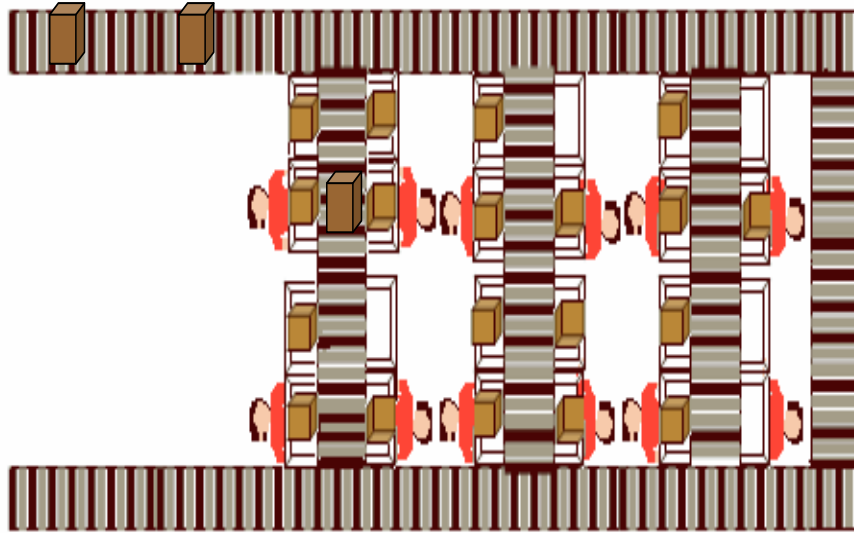


Figura 1.1: Diseño de la línea de producción

de producción, hasta concluir con los pedidos a satisfacer en ese día. El orden de los grupos de pedidos y su tamaño son determinadas la noche anterior.

Después de que los trabajos llegan al área de recepción para la línea de ensamble, se envían por una banda transportadora a las diferentes estaciones de trabajo [1].

Las estaciones de trabajo están ordenadas en columnas (5). Cada columna tiene el mismo número de estaciones (8).

Hay un operador trabajando en cada estación durante un turno completo.

Las estaciones de trabajo tienen dos espacios disponibles:

- El primero es un espacio de espera. Sobre este espacio, el próximo trabajo a completar espera hasta que el operador termina de ensamblar el actual. Los trabajos llegan uno a la vez a este espacio inmediatamente después de que el operador cambia

el trabajo que estaba en espera al espacio de trabajo.

- El segundo, llamado espacio de trabajo, es donde el operador actualmente ensambla un trabajo.

La figura 1.2 presenta una vista de dos estaciones con sus correspondientes áreas de trabajo.

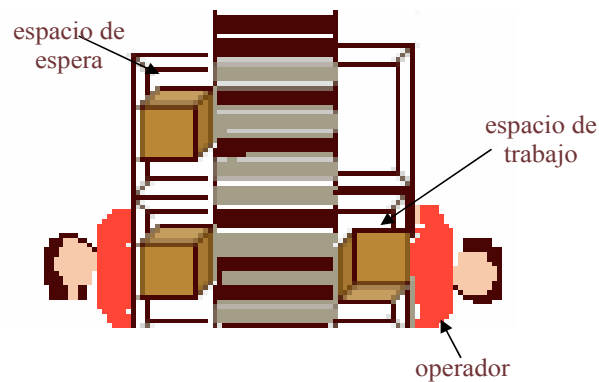


Figura 1.2: Estaciones de trabajo

Cada estación tiene una computadora donde el operador recibe información acerca de las características del trabajo actual, puede pedir ayuda si lo necesita y reporta el trabajo terminado con su correspondiente clave anexada en forma de etiqueta al artículo terminado.

Actualmente, cada trabajo que llega a la línea continúa por la rama principal de la entrada de la banda transportadora. Cuando éste llega a la primera columna de estaciones, verifica si hay algún espacio de espera desocupado para entrar. Si lo hay, el trabajo entra a éste, si no, el trabajo continúa por la banda transportadora haciendo la misma verificación para las siguientes columnas. Cuando el trabajo llega a la última columna de estaciones, éste automáticamente entra en un espacio de espera desocupado; sin embargo, si no hay un espacio de espera desocupado,

el trabajo continuará hasta la banda transportadora de la salida y regresará a la entrada de la línea a través de la banda de retorno.

La entrada y salida de la banda transportadora están conectadas a través de la banda de regreso, de tal forma que si un trabajo de ensamble no pudo mandarse a ningún espacio de espera, éste continúa a través de la línea hasta regresar a la entrada de la banda transportadora.

Al final de un turno, se deja un trabajo en cada uno de los espacios de cada estación, esto implica que los operadores en el siguiente turno puedan empezar a trabajar desde que llegan a sus estaciones [9].

La forma en que se realiza en la actualidad la asignación de trabajos trae como consecuencias:

- ✓ Debido a la forma de operación, aquellos operadores que se encuentran en las primeras columnas de estaciones de trabajo, son los que reciben un mayor número de trabajos a ensamblar. Por tal razón la ubicación de los operadores en las estaciones de trabajo se efectúa de manera aleatoria diariamente.

- ✓ Si en la asignación de tareas todas las estaciones de trabajo tienen sus dos áreas ocupadas, la orden que no encontró lugar para ser ensamblada se regresa a la entrada de la banda transportadora, lo que ocasiona retardos.

- ✓ En las órdenes para un cliente que hace varios pedidos juntos, esta forma de asignación causa problemas de control de la terminación de la orden de compra.

1.2. OBJETIVO DE LA TESIS

Por lo anteriormente presentado, se desea encontrar una asignación que nos permita distribuir los trabajos minimizando el total de tiempo empleado. Así mismo, se requiere disminuir el efecto de retorno de trabajos no asignados.

El objetivo principal de este trabajo es construir un modelo matemático que encuentre una distribución óptima de los trabajos hacia los operadores, utilizando información sobre sus habilidades y capacidades para ensamblar las distintas clases de computadoras y equipos periféricos.

También se desea realizar un análisis de los resultados que se obtengan de dicha asignación óptima para lograr que esta satisfaga los requerimientos necesarios en la línea de ensamblaje, tales como el balanceo de la carga de trabajo.

1.3. IMPORTANCIA DEL TRABAJO

En muchos de los problemas que se presentan en la actualidad, el tiempo se torna un factor importante y es por ello que la realización de una buena asignación de trabajos a los operadores es relevante. El lograr que se realicen los trabajos en menor tiempo implica menos gastos para la empresa y con una buena programación de justo a tiempo, los pedidos llegarán a su destino en el tiempo establecido en la orden de pedido.

Es también congruente que al momento de tener el resultado de una asignación óptima, se disminuirá el efecto de retorno de trabajos, ya que dicha asignación nos dirá desde un principio cuáles trabajos van dirigidos a qué operadores.

1.4. ALCANCE

Debido a que no se dispone de ejemplos de casos reales, estos fueron generados estableciendo datos de tiempos medios esperados por operador para cada tipo de artículo, además de una composición de lotes variada que cubra todas las posibilidades de planeación del ensamblado de pedidos. Por tal razón, creemos que estos ejemplos representan buenos casos para el estudio a realizar, en relación a los tiempos totales estimados del ensamblado de un lote.

Los programas que se realizaron a lo largo del trabajo, están hechos de tal manera que funcionen independientemente de la calidad de los datos de entrada (reales o generados), por lo que lo único que cambiaría serían los resultados de estos.

El tipo de ejemplos que se trataron en este trabajo de tesis consideran 40 operadores y 80 artículos por lote, generados de distintas formas, entre las que se encuentran: aquellos ejemplos donde cada lote está formado por no más de 5 artículos de una clase; ejemplos donde cada lote contiene entre 15 y 25 artículos de una clase; aquellos ejemplos donde se tienen 2 artículos de cada clase; ejemplos donde se tienen entre 65 y 75 artículos de una única clase y finalmente aquellos ejemplos donde todo el lote se forma de un solo tipo de artículo.

El problema de asignación se trató desde diversas perspectivas, primeramente se plantea un *Problema de Asignación Clásico* ya que se desea minimizar el tiempo total de trabajo; sin embargo estas soluciones traen como consecuencia un desequilibrio en la carga de trabajo entre los operadores. Se propone después utilizar el *Problema de Asignación de Cuello de Botella* con el cual se logra un balanceo en carga de trabajo, pero este método requiere demasiado tiempo de cómputo para encontrar una solución; para obtener soluciones con una carga de trabajo balanceada y que se obtengan con tiempos de cómputo aceptables, se propone el uso de cotas para los tiempos esperados de ensamblado por operador.

1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el capítulo dos se definirán algunos conceptos generales que serán utilizados a lo largo de la tesis, así como también se describen los modelos de asignación que se utilizarán más adelante y detalles de la programación de tareas.

El problema abordado desde el punto de vista de otros autores y su método propuesto se describen en el capítulo tres.

En el capítulo cuatro se detalla la problemática presente en el desarrollo de la metodología propuesta y la forma en que se logró la solución final a esta metodología.

La descripción de las instancias y de los programas desarrollados para la solución del problema se muestran en el capítulo cinco.

En el capítulo seis se presenta el análisis de resultados, las conclusiones y el trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definen algunos términos que serán utilizados a lo largo de todo el trabajo y se da una breve introducción a los problemas de asignación abordados en la literatura y se realiza también una comparación entre dichos problemas y el caso bajo estudio.

2.1. OPTIMIZACIÓN

En la gran mayoría de las aplicaciones prácticas se emplean modelos matemáticos para representar un sistema o proceso de interés con el fin de estudiar y entender el funcionamiento del mismo. Podemos decir que un modelo es un conjunto de relaciones matemáticas que representan una abstracción del sistema real en consideración [6].

En particular, los modelos matemáticos se desarrollan para analizar y entender fenómenos complejos. La optimización se utiliza en este contexto para determinar la forma y las características del modelo que más se aproximen a la realidad [13].

Un modelo matemático consta de tres elementos clave: variables, parámetros y restricciones o relaciones matemáticas. Las variables pueden ser continuas, enteras o mixtas (combinación de continuas y enteras), pueden tomar diferentes valores y sus especificaciones determinan diferentes estados del sistema. Representan las

decisiones que se pueden tomar para afectar el rendimiento del sistema, por ejemplo, la cantidad de producto a fabricar o vender, la cantidad de materia prima, etc.

Los parámetros se fijan a valores específicos y cada especificación determina un modelo diferente. Las relaciones matemáticas pueden ser clasificadas en igualdades, desigualdades y condiciones lógicas. Usualmente las igualdades son utilizadas para representar los balances de materia y energía; relaciones de equilibrio, cálculos de propiedades físicas y relaciones de diseño que describen el sistema físico. Las desigualdades generalmente representan la asignación de recursos, los límites de capacidad disponible y demanda. Mientras que las condiciones lógicas proveen las conexiones de este tipo entre las variables continuas y las variables enteras.

Un problema de optimización, además de tener las características de un modelo matemático, cuenta con uno o múltiples criterios que representan el desempeño del sistema o proceso. El criterio de desempeño denota la función objetivo del problema de optimización. La función objetivo representa una medida de desempeño cuantificable que se quiere ya sea maximizar o minimizar. Por ejemplo, los costos, en general representan una medida de desempeño que se desea minimizar y las ganancias una medida que se quiere maximizar [6].

La formulación (2.1) es la representación general de un problema de minimizar.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{sujeto a:} \\ h(x) = a \\ g(x) \leq b \\ x \in X \end{aligned} \tag{2.1}$$

Si cualquiera de las funciones f, g, h es no lineal, entonces, la formulación (2.1) es llamada *problema de optimización no lineal*. Las funciones f, g, h pueden tomar cualquier forma de no linealidad. Este tipo de problemas abundan en un gran número de aplicaciones en diversas áreas tales como diseño y control de procesos

químicos, diseño de redes, diseño de circuitos electrónicos, entre otras.

Una vez que se tiene el problema de optimización se procede a resolverlo con el fin de encontrar la mejor solución que cumpla con el conjunto de restricciones. Al conjunto de soluciones que cumplen con el conjunto de restricciones se les conoce como *soluciones factibles* y la mejor de ellas es conocida como *solución óptima*. Lo deseable es encontrar la solución óptima, sin embargo muchas veces esto no es posible dadas las características de los problemas. Estas características en general se relacionan con la convexidad [6].

Se dice que un conjunto $S \in \mathbb{R}^n$ es un *conjunto convexo* si para cualquier par de puntos x_1 y $x_2 \in S$ se satisface que $\alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2 \in S \forall \alpha \in [0, 1]$.

Ahora bien, sea S un conjunto convexo, se dice que f es *convexa* si y sólo si para cualquier $x_1, x_2 \in S$ y $0 \leq \alpha \leq 1$, se satisface

$$f[(1 - \alpha)x_1 + \alpha x_2] \leq (1 - \alpha)f(x_1) + \alpha f(x_2). \quad (2.2)$$

Más aún decimos que f es *estrictamente convexa* si y solo si la desigualdad dada en 2.2 es estricta cuando $x_1 \neq x_2$ y $0 \leq \alpha \leq 1$.

En la figura 2.1a) podemos observar gráficamente una función convexa, en la 2.1b) una función estrictamente convexa y en la figura 2.2 se representa una función no convexa.

Decimos que $x^* \in S$ es un *mínimo global*, si $\forall x \in S$ se satisface

$$f(x^*) \leq f(x). \quad (2.3)$$

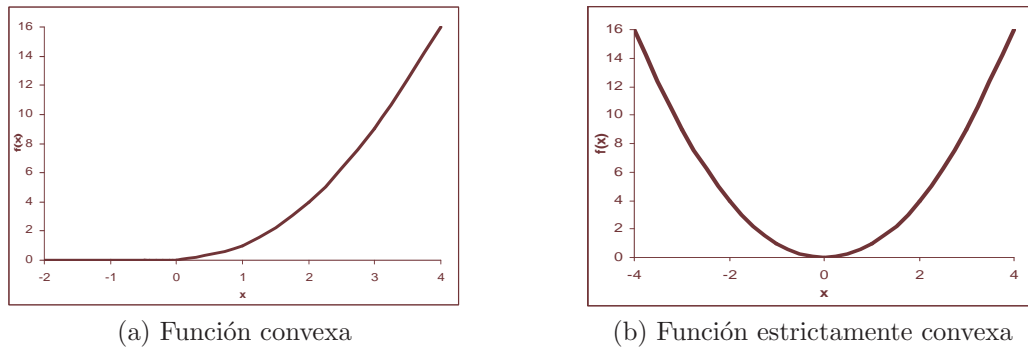


Figura 2.1: Funciones convexas

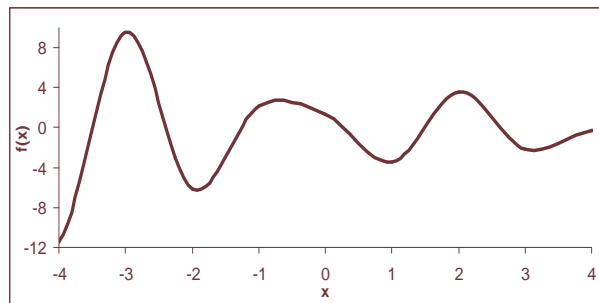


Figura 2.2: Función no convexa

Si $x^* \in S$ y existe una *vecindad* $V(x^*)$ de x^* tal que se satisface 2.3 $\forall x \in S \cap V(x^*)$, se dice que x^* es un *mínimo local*.

Una función estrictamente convexa f tiene a lo más una solución óptima. Además cualquier mínimo local de f es un mínimo global [10].

Si $f(x)$ no es convexa, es posible tener varias soluciones óptimas locales, provocando que los métodos utilizados para resolver el problema se queden atrapados en ellos, reduciendo la posibilidad de encontrar una solución óptima global [10].

Cuando se tienen múltiples criterios en un problema de optimización, el problema se clasifica como de *optimización multicriterio*. En la práctica es

muy común la existencia de este tipo de problemas. Por ejemplo, en muchas empresas se pretende maximizar la calidad del producto y minimizar su costo de producción simultáneamente. Esto algunas veces implica un conflicto. Existen diversas técnicas que se han desarrollado con el fin de resolver este tipo de problemas.

Las técnicas de optimización multicriterio tienen como objetivo encontrar aquellas soluciones que representen los mejores compromisos entre todas las medidas de desempeño, las cuales se denominan *soluciones eficientes* [8].

Nosotros nos enfocaremos principalmente en un problema de optimización lineal el cual es llamado *problema de asignación*.

2.2. PROBLEMAS DE ASIGNACIÓN CON UNA TAREA POR AGENTE

Los problemas de asignación consisten en la correspondencia óptima entre elementos de dos o más conjuntos, donde la dimensión del problema se refiere al número de conjuntos de elementos que se asignarán. Los problemas que veremos se enfocan a aquellos donde sólo existen dos conjuntos, a los cuales llamaremos “tareas” y “agentes” respectivamente; las tareas pueden ser trabajos que van a hacer los agentes, el personal o las máquinas. Aunque el nombre de “problema de asignación” apareció por primera vez en el año 1952, en la actualidad existen diversas variaciones del problema de asignación clásico. Entre éstas se encuentran: el problema de asignación del cuello de botella, el problema de asignación generalizada, el problema de asignación cuadrático, el problema de semi-asignación y otras variedades. También se encuentran otros problemas donde se combinan dos o más de estas variaciones.

A continuación se describen algunos de los problemas de asignación, así como

sus características principales [12].

2.2.1. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN CLÁSICO

La versión original del problema de asignación se describe usualmente como el problema de encontrar una combinación uno a uno entre n tareas y n agentes, con el objetivo de minimizar el costo total de la asignación. Los ejemplos clásicos involucran situaciones como asignación de trabajos a máquinas, trabajos a operadores u operadores a máquinas.

Sea i el índice que representa a un agente y j el índice que representa a una tarea. El modelo matemático del problema de asignación clásico tiene un conjunto de variables de decisión binarias

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se le asigna al agente } i \text{ la tarea } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.4)$$

Se tiene el siguiente problema:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.5)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2.7)$$

La función objetivo se muestra en (2.5) y desea determinar qué tarea debe ser asignada a cada agente con el fin de minimizar el costo total, es decir, la suma de los n costos c_{ij} en los que se incurre. Las restricciones en (2.6) indican que cada tarea

debe ser asignada a un único agente. Mientras que las restricciones (2.7) aseguran que a cada agente se le asigne exactamente una tarea.

Al modelo matemático expresado en (2.4)-(2.7) le llamamos problema de asignación clásico (CAP).

La estructura matemática del problema hace que las restricciones (2.4) no sean necesarias debido a que automáticamente será una solución óptima de un problema lineal en las que todas las x_{ij} toman valores de 0 ó 1.

Modificaciones menores de la estructura básica del “CAP” se manejan fácilmente con procedimientos de solución estándares. Un problema en el cual la función objetivo se maximiza puede convertirse fácilmente a un problema de minimizar (a) multiplicando todos los c_{ij} por -1, o (b) reemplazando cada c_{ij} por $c_{max} - c_{ij}$, donde c_{max} es el máximo de los c_{ij} . Un problema que no es balanceado, esto es, el número de tareas y de agentes son diferentes, puede convertirse fácilmente en un problema balanceado, agregando un número suficiente de tareas o agentes “ficticios” con costos de 0 en un problema de maximizar o de M , un número muy grande, para un problema de minimizar.

Es importante mencionar que el CAP es matemáticamente idéntico al “weighted bipartite matching problem” de teoría de grafos, así que los resultados del problema de grafos se han usado en la construcción de soluciones eficientes para el problema de asignación clásico.

2.2.2. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN CLÁSICO CONSIDERANDO LA CALIDAD DE LOS AGENTES

Un trabajo sobre una versión particular del problema de asignación con restricciones laterales [12] utiliza un modelo matemático de una variación del CAP en

el cual hay m agentes y n tareas, donde $m < n$, no todos los agentes están calificados para realizar cada tarea y el objetivo es maximizar la utilidad:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.8)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m q_{ij} x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} x_{ij} \leq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (2.10)$$

donde:

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el agente } i \text{ está calificado para realizar la tarea } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.11)$$

En la función objetivo (2.8) c_{ij} representa la utilidad de asignar al agente i la tarea j (con $c_{ij} = 0$ si $q_{ij} = 0$). El primer conjunto de ecuaciones (2.9) asegura que no más de un agente calificado sea asignado a una tarea y las restricciones (2.10) asegura que a ningún agente calificado se le asigne más de una tarea. Nótese que si $m > n$ no es posible asignar un agente calificado a cada tarea o dar a cada agente una tarea para la cual esté calificado. De hecho en algunos casos no es posible aún y cuando $m < n$.

2.2.3. PROBLEMA DE SEMI-ASIGNACIÓN

El problema de semi-asignación es como el problema de asignación, excepto que se restringe a que sólo las filas o las columnas (no ambas) de la matriz de asignación (X_{ij}) tengan un componente igual a 1, debido a que no existe el mismo número de agentes que de tareas.

Si se tienen m agentes y n tareas, y $m > n$, el modelo resulta:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.12)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.13)$$

La restricción (2.13) pudo haber sido $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, m$ en el caso cuando $m < n$. En el primer caso no todos los agentes tienen tarea y en el segundo no todas las tareas son asignadas.

2.2.4. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE CUELLO DE BOTELLA

Mientras el objetivo del problema de asignación clásico es minimizar la suma de los costos de la asignación de tareas a agentes, el objetivo del problema de asignación de *cuello de botella* (BAP por sus siglas en inglés, “Bottleneck Assignment Problem”) es minimizar el máximo de los costos de la asignación. Un ejemplo podría ser determinar como asignar trabajos de impresión a las prensas para minimizar el tiempo en el cual todos los trabajos estén terminados.

La función objetivo para el BAP se muestra en (2.14)

$$\text{Minimizar } \max_{i,j} c_{ij} x_{ij} \quad \text{ó} \quad \text{Minimizar } \max_{ij} \{c_{ij} | x_{ij} = 1\} \quad (2.14)$$

Sujeto a las mismas restricciones y definiciones del CAP (2.4), (2.6) y (2.7). Este modelo difiere del CAP ya que resolver la versión de programación lineal de este problema no nos garantiza una solución binaria, así que las restricciones (2.4) son necesarias.

La ventaja de plantear el problema de esta manera es que este problema disminuye los tiempos más elevados haciendo un mejor balanceo entre los tiempos de trabajo de los operadores.

2.2.5. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN BALANCEADA

Mientras que el BAP puede ser formulado para encontrar la asignación que minimizará el valor máximo o maximizará el valor mínimo, ni una ni otra aproximación considera los valores de las otras asignaciones. El problema de asignación balanceada intenta considerar ambos objetivos para minimizar la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de asignación.

La función objetivo para el problema de asignación balanceado se representa así:

$$\text{Minimizar } \max_{i,j} \{c_{ij} | x_{ij} = 1\} - \min_{i,j} \{c_{ij} | x_{ij} = 1\} \quad (2.15)$$

Sujeto a las mismas restricciones y definiciones que el problema de asignación clásico (2.4), (2.6) y (2.7).

2.3. PROBLEMAS DE ASIGNACIÓN CON MÚLTIPLES TAREAS POR AGENTE

En esta sección nos enfocaremos en aquellos modelos con múltiples tareas por agente, empezando con diferentes versiones del problema de asignación generalizada.

2.3.1. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN GENERALIZADA

La versión más básica del problema de asignación que permite que a un agente se le asigne múltiples tareas es el llamado problema de asignación generalizada o

GAP. Este modelo supone, como en el CAP, que cada tarea sea asignada sólo a un agente, pero permite la posibilidad de que a un agente se le puede asignar más de una tarea, tomando en consideración la capacidad de los agentes [17]. Considerando que una tarea puede usar sólo parte de la capacidad del agente, presentamos el siguiente modelo:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.16)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.17)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (2.18)$$

donde:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si al agente } i \text{ se le asigna la tarea } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.19)$$

En la función objetivo (2.16) c_{ij} representa el costo de asignar al agente i la tarea j y se desea minimizar el costo de la asignación; el primer conjunto de restricciones (2.17) aseguran que cada tarea se asigne sólo a un agente; en (2.18) la variable a_{ij} es la proporción de la capacidad total del agente i que necesita para realizar la tarea j , este conjunto de restricciones asegura que el conjunto de tareas asignadas a un agente no exceda su capacidad.

2.3.2. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN GENERALIZADA DE CUELLO DE BOTELLA

De la misma manera en que la función objetivo del CAP puede ser reemplazada por la expresión minimax en el problema de asignación de cuello de botella (o BAP), se puede hacer el problema de asignación generalizada con el objetivo minimax lo que da lugar al problema de asignación generalizada de cuello de botella (BGAP).

Mazzola y Nebbe [12] identifican dos versiones del BGAP: (1) La *tarea BGAP*, donde el objetivo es minimizar el máximo de los costos de la asignación, y (2) El *agente BGAP*, en el cual, el objetivo es minimizar el máximo de la suma de los costos de un agente. Las aplicaciones de ambos modelos incluyen localización de instalaciones y programación de máquinas. Martello y Coth consideran que la tarea BGAP puede ser útil en el sector público modelando situaciones tales como, asignar áreas urbanas a centros de servicio, como hospitales o escuelas, donde el objetivo sería minimizar el máximo tiempo de viaje entre el centro y el área que se está sirviendo.

2.3.3. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN MINIMIZANDO EL TIEMPO DE DESEQUILIBRIO

Se considera una variación del problema de asignación de cuello de botella, en el cual hay m agentes y n tareas por hacer, donde $m < n$; y como cada tarea debe hacerse, algunos agentes se le asignarán más de una tarea. Como en el agente BGAP todos los agentes pueden empezar trabajando sobre sus tareas simultáneamente, aunque un agente con más de una tarea puede hacerlo secuencialmente; el objetivo es minimizar el tiempo en el cual todas las tareas se terminan. Se diferencia del modelo BGAP en que éste no considera la limitación de recursos sobre el número de tareas a las que a un agente se le puede asignar. El modelo matemático del problema de asignación para minimizar el tiempo de desequilibrio está dado de la forma siguiente:

$$\text{Minimizar } \max_i \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.20)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.21)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (2.22)$$

2.4. ANÁLISIS DE DIFERENTES CASOS

El problema base de estudio de este trabajo, descrito en la sección 1.1, se presenta como un problema de asignación de $2n$ tareas a n operadores. Cuando se dispone de un tamaño de lote preestablecido, pero la cantidad de operadores no cumple con los requerimientos de asignación de 2 tareas por cada operador, entonces se proponen las siguientes alternativas para el modelo de asignación:

- Permitir a cada operador realizar 2 o más tareas, excepto a los ausentes para los cuales se les impondrá una condición de 0 tareas. Esta condición no favorece al balance de trabajo entre los operadores.
- Realizar la asignación sin considerar la ausencia de operadores, asegurando que los artículos lleguen al área de trabajo y posteriormente asignar los trabajos no realizados entre los operadores que hayan realizado su trabajo en el menor tiempo; esto permite que no se incremente demasiado la diferencia de tiempo de trabajo entre los operadores, aunque es este caso los operadores con mayor habilidad terminan ensamblando mayor cantidad de artículos.
- Si el caso de ausencia es al inicio de la jornada de trabajo, se puede resolver el modelo de asignación sin considerar estas ausencias, asegurando que los artículos lleguen al área de trabajo y permitiendo que los operadores con retraso inicien su labor. Si existe un desbalance en estos casos, debe considerarse el retraso en el inicio del ensamblado cuando se realice la actualización de información del proceso.

En caso de que se requiera tomar en cuenta la habilidad de los operadores y un factor de diferencia entre ellos, como pudiera ser el salario debido a sus capacidades, se podría utilizar el modelo de asignación que considera la capacidad de los agentes. Se incluye un factor de ponderación en la función objetivo de nuestro modelo, como un costo por trabajador y esto es lo que se va a minimizar. Sólo ese cambio ocurre

en el modelo.

En una primera instancia decidimos plantear el problema como un CAP por que nuestro objetivo primordial es minimizar el tiempo total trabajado.

2.5. PROGRAMACIÓN DE TAREAS

La programación de tareas es un proceso de toma de decisiones que juega un rol muy importante en muchas industrias de servicio y manufacturas. Se utiliza en producción, transportación y distribución y en procesamiento de información. La función de la programación de tareas en una compañía utiliza técnicas matemáticas o métodos heurísticos para asignar recursos limitados para el procesamiento de tareas. Una adecuada asignación de recursos permite a la compañía optimizar sus objetivos y lograr sus metas. Los recursos pueden ser máquinas en una estación de trabajo, pistas de aterrizaje en el aeropuerto o unidades de procesamiento en un ambiente computacional. Las tareas pueden ser operaciones en un taller, despegues y aterrizajes en el aeropuerto o la ejecución de programas computacionales. Cada tarea puede tener un nivel de prioridad. Los objetivos pueden tomar también diferentes formas, tales como minimizar el tiempo para completar todas las tareas o minimizar el número de tareas terminadas después de sus fechas de entrega establecidas [14].

Los siguientes ejemplos ilustran el rol de la programación de tareas en algunas situaciones de la vida real.

Ejemplos en manufacturas:

- Proyecto de la instalación del sistema
- Fabricación de un microprocesador
- Línea de ensamblaje de automóviles

- Plan de producción en una fábrica de papel
- Sistema de reservación

Ejemplos en servicios:

- Programación de enfermeras en un hospital

La programación de tareas en manufactura: Los trabajos en un ambiente de manufactura muchas veces tienen que ser procesados sobre máquinas en un centro de trabajo, en un orden o secuencia dada. El procesamiento de trabajos puede retardarse en ciertas máquinas que están ocupadas y las interrupciones pueden ocurrir cuando llegan trabajos de alta prioridad a las máquinas y tienen que ser procesados uno a la vez. Eventos no esperados en la planta, tales como descompostura de una máquina o tiempos de procesamiento más grandes que el esperado, también se tienen que considerar debido a que pueden tener un mayor impacto sobre la programación de los trabajos. La planta no es la única parte de la organización que afecta el proceso de programación de tareas. Las decisiones tomadas en el nivel de planeación más alto también afectan directamente la programación de tareas. En manufactura la programación de tareas tiene la función de interactuar con otros procedimientos de toma de decisiones usadas dentro de la planta. Un sistema popular que es ampliamente usado es el *sistema de planeación de requerimiento de material* (MRP Material Requirements Planning). Después de que la programación de tareas ha sido adaptada toda la materia prima y los recursos deben estar disponibles en los tiempos especificados. Los tiempos de terminación de todos los trabajos son determinados en conjunto por el plan de producción, el sistema de programación de tareas y el sistema MRP [15].

La programación de tareas en servicios: Describir una organización de servicios y su sistema de programación de tareas no es fácil. La función de la programación de tareas en una organización de servicios puede enfrentarse a una variedad de

problemas, por ejemplo, la reservación de recursos (camiones, habitaciones u otras instalaciones) o la programación de trabajadores (asignación de turnos).

2.5.1. MODELOS CARACTERÍSTICOS DE LA PROGRAMACIÓN DE TAREAS

Los sistemas de manufacturas y servicios se caracterizan por muchos factores: el número de máquinas o recursos, su configuración y características, el nivel de automatización, etc. La diferencia en todas estas características da como resultado un gran número de modelos de programación de tareas [14].

- *Modelos de programación de proyectos.* Es importante en proyectos grandes multi-etapas. Un proyecto como la construcción de una pieza especial o el desarrollo de una herramienta computacional, típicamente consiste de un número de actividades o trabajos, algunos de los cuales pueden estar sujetos a *restricciones de precedencia*. Los trabajos que están sujetos a restricciones de precedencia no pueden empezarse hasta que otros trabajos hayan sido completados. Una suposición básica es que tenemos disponible un número de máquinas ilimitado, así que un trabajo puede empezar tan pronto como todos sus predecesores hayan sido completados. El objetivo es minimizar el tiempo de terminación del último trabajo.
- *Modelo sobre pedido (Job Shop).* Un trabajo consiste de un número de operaciones que tienen que ser realizadas en diferentes máquinas. Las máquinas son adaptadas en una cierta configuración y cada trabajo sigue su propia ruta a través del sistema. Los trabajos se programan para minimizar uno o más objetivos.
- *Sistemas de producción con manejo de material automatizado.* Un trabajo consiste de un número de operaciones y los ambientes de producción incluyen sistemas de manufactura flexibles, sistemas de ensamblaje flexibles.

- *Programación de lotes.* Se usan en planeación y control de producción a mediano y largo plazo. En contraste a las primeras tres clases, el proceso de demandas y la producción son continuos. Los modelos de programación de lotes manejan una variedad de productos diferentes. Cuando una máquina cambia de un producto a otro se incurre en un costo de transición. La meta es minimizar dicho costo. Estos modelos son importantes en procesos industriales, como refinerías de petróleo y fábricas de papel.
- *Sistemas de reservación.* Los tiempos de inicio y fin de los trabajos son fijos por adelantado. Por ejemplo, en una agencia de renta de carros un trabajo es equivalente a la reservación de un carro en un período de tiempo dado. El objetivo es procesar tantos trabajos como sea posible.
- *Modelos de programación de trabajadores.* En el mundo real la programación de trabajadores y la programación de máquinas se entrelazan debido a que la programación de máquinas depende de la asignación de turnos.

2.5.2. CONFIGURACIÓN DE LAS MÁQUINAS

- *Modelos de una sola máquina (Single-machine models)* Numerosos sistemas de producción hacen uso del modelo de una máquina. Por ejemplo, si un cuello de botella ocurre en un ambiente de múltiples máquinas, entonces la secuencia de trabajos en el cuello de botella típicamente determina la realización del sistema entero. En este caso todas las operaciones se programan después de que se programa el cuello de botella. Esta aproximación implica que el primer problema original tiene que reducirse a un problema de programar una máquina [15].
- *Modelos de máquinas paralelas (Parallel-machine models)* Es la generalización del modelo de una máquina. Muchos ambientes de producción consisten de un número de etapas o centros de trabajo, cada uno con máquinas en paralelo. Las

máquinas en paralelo pueden no ser idénticas. Algunas máquinas pueden ser más viejas que otras y pueden operar a una menor velocidad, o alguna máquina puede tener mejor mantenimiento y es capaz de trabajar con más alta calidad que otras. En este caso algunos trabajos pueden ser procesados en cualquiera de las m máquinas en paralelo, mientras que otros pueden procesarse sólo en algunas de las m máquinas. Cuando las máquinas son personas, entonces el tiempo de procesamiento de una operación puede depender de qué tan bien trabaje el operador. Un operador puede ser excelente en un tipo de trabajo, o bien los operadores pueden especializarse en el tipo de trabajo a realizar en el proceso [11].

- *Modelos de producción en serie (Flow Shop Models)* Las rutas de todos los trabajos son iguales, esto es, todos los trabajos pasan por las mismas máquinas en el mismo orden. Una generalización del modelo de producción en serie es el *modelo flexible de producción en serie* como se muestra en la figura 2.3, el cual consiste de un número de etapas en serie, con un número de máquinas en paralelo en cada etapa.

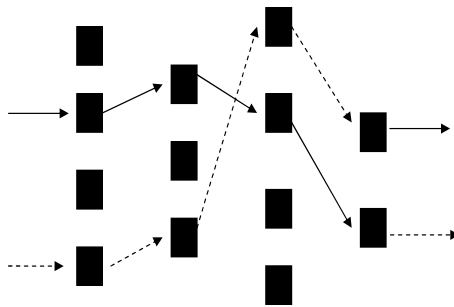


Figura 2.3: Modelo flexible de producción en serie

- *Modelos sobre pedido (Job Shop Models)* Son una generalización del flow shop y consiste en trabajos con diferentes rutas como se muestra en la figura 2.4. Modelos simples para un trabajo que puede ser procesado en una máquina en particular a lo más una vez a lo largo de su ruta. En otros modelos se

permite visitar varias veces una máquina. Estos trabajos se dicen que están sujetos a re-circulación que incrementa significativamente la complejidad del modelo. También se tiene el *modelo flexible sobre pedido*, con centros de trabajo con múltiples máquinas en paralelo. El *modelo flexible sobre pedido con re-circulación* es el más complejo desde el punto de vista combinatorio, es muy común en la industria de microprocesadores.

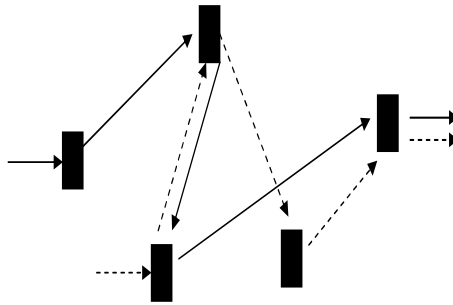


Figura 2.4: Modelo sobre pedido

Es importante definir brevemente algunos términos que serán utilizados más adelante. El número de trabajos se denota como n , el número de máquinas por m . Se usan los subíndices j y k para los trabajos, h e i para las máquinas. Los siguientes datos se asocian al trabajo j :

- *Tiempo de procesamiento* (t_{ij}). Representa el tiempo que el trabajo j permaneció en la máquina i . La tasa de producción de la máquina de tipo i se denota por $q_i = 1/t_i$, donde t_i es el tiempo de uso de la máquina i .
- *Fecha de liberación* (r_j) (Release date). Es también conocida como la fecha en que el trabajo está listo para procesar (ready date). Es el tiempo en que el trabajo llega al sistema, esto es, el tiempo más temprano en el cual el trabajo j puede empezar a procesarse.
- *Fecha de entrega* (d_j) (Due date). Representa la fecha de terminación (fecha en la cual se promete al cliente que se va a entregar el trabajo). Si el tiempo

de terminación del trabajo es después que su fecha de entrega, se incurre en un costo de penalización.

- *Peso (w_j)*. Es un factor de prioridad y denota la importancia que tiene el trabajo j sobre los otros trabajos en el sistema. Puede ser el costo de mantenimiento o de inventario.

Estos datos son estáticos, no dependen de la programación de tareas. Por el contrario los datos que no se fijan por adelantado pero que dependen de la programación se llaman dinámicos:

- *Tiempo de terminación (C_{ij})*. Es el tiempo en el que se termina el trabajo j en la máquina i . Si se omite el subíndice i , C_j representa el tiempo en que el trabajo j deja el sistema.

2.5.3. REGLAS DE DESPACHO

Es una regla que da prioridades a todos los trabajos que están en espera de ser procesados en una máquina. El esquema de prioridades puede tomar atributos en la cantidad de trabajos y atributos de la máquina. Cuando una máquina está desocupada, una regla de despacho inspecciona los trabajos en espera y selecciona el trabajo con más alta prioridad [16].

- *Reglas estratégicas*. No dependen del tiempo, están en función de los trabajos o máquinas.
- *Reglas dinámicas*. Dependen del tiempo, por ejemplo, ordenar los trabajos de acuerdo a la fecha de entrega.

De acuerdo a la información que necesitan las reglas de despacho pueden ser:

- *Regla local*. Usa sólo información relacionada a cualquier cola o máquina donde el trabajo está esperando ser procesado.

- *Regla global.* Puede usar información relacionada a otras máquinas, tales como el tiempo de procesamiento del trabajo en la siguiente máquina de su ruta o la longitud de cola actual en la máquina.

Algunas reglas de despacho básicas son:

- *Regla de servicio en orden aleatorio (SIRO Service in Random Order rule).* Cuando la máquina está disponible, el próximo trabajo se selecciona de forma aleatoria, de los que están en espera de ser procesados. No intenta optimizar ningún objetivo.
- *Regla de la fecha de liberación más próxima primero (ERD Earliest Release Date first rule).* Esta regla es equivalente al FIFO (Firs In First Out), minimiza la variación en los tiempos esperados de trabajos en una máquina.
- *Regla de la fecha de entrega más próxima primero (EDD Earliest Due Date first rule).* Cuando una máquina está libre se selecciona el trabajo con la fecha más próxima de entrega para ser procesado. Esta regla tiende a minimizar la máxima tardanza entre los trabajos.
- *Regla de mínima holgura primero (MS Minimum Slack first rule).* Esta es una variación de la EDD, si una máquina está libre en el tiempo t la holgura restante de cada trabajo se define como $\max(d_j - p_j - t, 0)$, el trabajo con mínima holgura es el próximo en procesar. Esta regla minimiza objetivos relacionados con la fecha de entrega.
- *Regla del menor tiempo de procesamiento con menor peso primero (WSPT Weighted Shortest Processing Time first rule).* Los trabajos se ordenan en forma decreciente según w_j/p_j . Esta regla tiende a minimizar la suma de los pesos de los tiempos de terminación, esto es, $\sum w_j C_j$. Cuando todos los pesos son iguales esta se reduce a la regla (SPT Shortest Processing Time first rule).

- *Regla del tiempo de procesamiento más grande primero (LPT Largest Processing Time first rule)*. Ordena los trabajos en orden decreciente según los tiempos de procesamiento. Cuando hay máquinas en paralelo la regla tiende a balancear la carga de trabajo sobre las máquinas.
- *Regla del tiempo de configuración más corto (SST Shortest Set up Time)*. Elige el trabajo con tiempo de configuración (set up) más corto.
- *Regla del trabajo menos flexible primero (LFJ Least Flexible Job)*. Cuando el trabajo puede ser procesado sobre el conjunto más chico de máquinas se selecciona este, esto es, se elige el trabajo con más pocas alternativas de procesamiento.
- *Regla de la ruta crítica (CP Critical Path)*. Se usa cuando los trabajos están sujetos a restricciones de trabajos anteriores, esta regla selecciona como próximo trabajo a aquel que encabeza la cadena más larga de tiempos de procesamiento en la gráfica de restricciones de trabajos anteriores.
- *Regla del más grande número de sucesores (LNS Largest Number of Succesors)*. Se usa igual que el CP. Este selecciona como próximo trabajo a aquel que tiene mayor número de trabajos que le siguen.
- *Regla de la fila más corta en la próxima operación (SQNO Shortest Queue at the Next Operation)*. Esta regla se usa en el modelo sobre pedido. Se selecciona el trabajo con la fila más corta en la próxima máquina de su ruta. Esta regla tiende a eliminar cuellos de botella.

Así como se utilizan estas reglas de despacho, también surgen algunas características y restricciones de procesamiento, entre las principales se encuentran:

- Restricciones de precedencia.
- Restricciones de ruteo

- Restricciones de materia prima
- Costos y tiempos de configuración que dependen de la secuencia
- Interrupciones debido a la prioridad de los trabajos
- Restricciones de espacio de almacén
- Restricciones de tiempo de espera
- Producir para almacenar o para vender
- Restricciones de elección de máquinas
- Restricciones de herramientas y recursos
- Restricciones de programación de personal

2.5.4. PROGRAMACIÓN DE SISTEMAS DE ENSAMBLAJE FLEXIBLES

Un sistema de ensamblaje flexible difiere del modelo sobre pedido. En un sistema de ensamblaje flexible hay un número limitado de diferentes tipos de productos y el sistema tiene que producir una cantidad dada de cada tipo de producto. Así que 2 unidades del mismo tipo de productos son idénticas.

El movimiento de trabajos en un sistema de ensamblaje flexible frecuentemente es controlado por un sistema de manejo de material (*material-handling system*) el cual impone restricciones sobre el tiempo de inicio de un trabajo sobre las máquinas; el tiempo de inicio de un trabajo sobre una máquina está en función de su tiempo de terminación sobre las máquinas anteriores de su ruta. El sistema de manejo de material también limita el número de trabajos en los contenedores entre las máquinas o estaciones de trabajo.

Analizaremos tres modelos de sistemas de ensamblaje flexible.

- El primer modelo representa una línea de flujo con un número de máquinas en serie. La línea es *arrítmica “unpaced”*, esto es, un solo trabajo puede pasar tanto tiempo como requiera en una máquina. Un número de diferentes tipos de productos tienen que producirse en cantidades dadas y la meta es maximizar el número de piezas producidas por unidad de tiempo *“throughput”*. Un ejemplo de este tipo de ambientes ocurre en el ensamblaje de copiadoras; diferentes tipos de copiadoras se ensamblan en la misma línea. Los diferentes tipos son usualmente de la misma familia y pueden tener muchas características comunes, sin embargo, ellas difieren en algunas opciones. Algunos tipos tienen un alimentador de papel automático mientras otros no, algunas tienen ópticos más elaborados que otros. El hecho de que las diferentes copiadoras tienen diferentes opciones implica que los tiempos de procesamiento en ciertas estaciones pueden variar.
- El segundo modelo es un *sistema de ensamblaje rítmico “paced”* con un sistema de banda transportadora que se mueve a una velocidad fija. Las unidades que van a ser ensambladas se mueven a una velocidad constante de una estación de trabajo a otra. La meta es secuenciar los trabajos de tal manera que no se sobrecargue ninguna estación de trabajo y los costos de configuración se minimicen.
- El tercer modelo es un sistema de flujo flexible con contenedores limitados y saltos de máquinas. En contraste con los primeros modelos, hay un número de máquinas en paralelo en cada centro de trabajo. Un trabajo puede ser procesado sobre alguna de las máquinas en paralelo o puede pasar un centro de trabajo por completo. El objetivo es maximizar el número de piezas producidas por unidad de tiempo.

La asignación de trabajadores y programación de personal se reparte de acuerdo al trabajo programado y la asignación de nuevo personal, en los cambios para cubrir la demanda de recursos que varían a través del tiempo. Estos problemas

surgen tanto en manufactura como en servicios. En el ambiente de servicios las operaciones frecuentemente son prolongadas e irregulares y los requerimientos de personal fluctúan a través del tiempo. La programación está sujeta a varias restricciones dadas por requerimiento de equipo, reglas sindicales, etc. Los problemas resultantes tienden a ser combinatoriamente difíciles.

2.6. ANALOGÍAS

En nuestro problema podemos considerar a los operadores en lugar de las máquinas; cabe mencionar que los artículos que se van a ensamblar únicamente llegan a un operador, éste lo recibe y lo ensambla hasta terminarlo, por lo que no se toma en cuenta que los artículos tengan una ruta que seguir y se asemeja a un modelo de máquinas paralelas, donde cada uno de los artículos pueden ser ensamblados por cualquiera de los operadores, y cada uno de éstos tiene capacidades y habilidades diferentes. Por otro lado, cada tipo de artículo que se va a ensamblar viene en una bandeja, donde están incluidos los componentes de dicho artículo y las herramientas necesarias para ensamblarlo, así que tampoco se incurre en costos de configuración.

Podemos considerar el sistema con un modelo de ensamblaje flexible tipo arrítmico, donde cada operador puede tardarse el tiempo necesario hasta terminar el artículo que está ensamblando.

En el sistema actual se expresa el reparto de artículos a operadores en una manera aleatoria, por lo que se puede decir que utilizan la regla de despacho de orden aleatorio, ya que cuando se desocupa un operador a éste se le asigna el próximo trabajo y en caso de haber varios operadores desocupados, se reparten los próximos artículos según el lugar donde están ubicados, esto es, los operadores

más cercanos a la entrada de la banda transportadora, son aquellos a los que se les asigna trabajo de una forma más rápida, mientras los más lejanos a la entrada de la banda transportadora, tienen más tiempo de ocio; además no existe un orden de como se deben acomodar los operadores.

La utilización de ésta regla de despacho (en orden aleatorio) como lo dice su definición, no intenta optimizar ningún objetivo, por lo que pensamos que debe haber una mejor manera de realizar la asignación de artículos para ensamblar, a los operadores.

En el sistema bajo estudio, se deben cumplir fechas de entrega, pero éstas se determinan en un departamento anterior, por lo que ese requerimiento no llega a ser un problema que debamos resolver en este trabajo.

También se tienen casos en los que un grupo de trabajos deben ser entregados en conjunto, a estos le llamaremos trabajos con prioridad.

Si el número de trabajos con prioridad es igual al número de operadores:

- a) En la asignación original, si a un operador le toca un trabajo con prioridad y uno sin prioridad, verificar sólo que el primer trabajo que se le envíe sea el que tiene prioridad.
- b) Si hubo al menos un operador que le tocó armar 2 trabajos de prioridad (entonces hay al menos uno que no le tocó ningún trabajo de prioridad), si lo que se requiere es terminar primero las prioridades, entonces se debe intercambiar uno de los trabajos entre dichos operadores para que todos tengan un trabajo de prioridad por armar, asegurándose que todos armen primero el artículo con prioridad.

Si el número de trabajos con prioridad es mayor que el número de operadores

entonces a cada operador al menos le corresponde un trabajo de prioridad, sólo se debe asegurar que éste sea el primero que ensamblen.

CAPÍTULO 3

EL PROBLEMA Y SUS ANTECEDENTES

En este capítulo describiremos un trabajo realizado por otros autores al sistema bajo estudio, así como sus opciones de solución y sus resultados [9].

3.1. SISTEMAS MULTIAGENTES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

El sistema desarrollado para esta investigación se basa en una línea de producción de computadoras y más específicamente en el problema de la línea de ensamblaje con operadores humanos. En conjunto representa un caso de un problema de programación de tareas, en el cual lo abordan como un modelo sobre pedido estocástico y dinámico.

En la actualidad, las tecnologías aplicadas de Inteligencia Artificial incluyen Algoritmos Genéticos (AG) y Sistemas Multiagentes .

Los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda basados en simulaciones de la evolución natural, mecanismos semejantes a los procesos de herencia, mutación, selección y cruzamiento. En ellos, los cromosomas o individuos representan las posibles soluciones al problema y se comparan según su función de ajuste. El ajuste de cada individuo se evalúa basándose en el valor de la función objetivo seleccionada.

Los sistemas multiagentes representan un paradigma para el desarrollo de sistemas de distribución basados en agentes. Estos últimos son definidos como entidades computacionales autónomas que actúan en un ambiente. Entre las principales ventajas del uso de los sistemas multiagentes son: su factibilidad en el uso de diferentes modelos y métodos para resolver el problema, la integración y optimalidad de una gama de objetivos dentro de la programación de tareas y una arquitectura que ayuda a lograr flexibilidad y tolerancia.

Este trabajo reúne los algoritmos genéticos y los sistemas multiagentes con el propósito de mejorar las operaciones de la asignación de trabajos.

3.1.1. SOLUCIÓN PROPUESTA

En la revisión de literatura, se presentan diversas opciones para solucionar el problema de la asignación de trabajo a operadores en base a los requerimientos del sistema.

- A) Algoritmo Genético programando por ventanas de tiempo
- B) Algoritmo Genético para competir los próximos n trabajos a ensamblar
- C) Algoritmo Genético programando los próximos n trabajos (sin competir)
- D) Programar para competir los próximos n trabajos a ensamblar (sin AG)

La principal ventaja de A) es su alto nivel de optimización, por que la mejor programación se calcula por el horizonte de tiempo que puede ser muy largo, sin embargo, para hacer eficiente esta opción requiere una operación muy estable de trabajadores que obedezcan a la imagen mental que el programador tiene de ellos. Por otro lado, la probabilidad de necesitar reprogramar trabajos ya asignados sería muy alta; entonces, esta alternativa de solución resulta computacionalmente muy

intensiva. De hecho, como las operaciones de los trabajadores son muy variables, esta opción es altamente desfavorable. La opción D) puede ser visto como lo opuesto a A).

Asignar cada trabajo tan pronto como llega a la línea, al mejor operador disponible, no necesita estimar tiempos de ensamblaje de los trabajos. Esta propuesta sería muy robusta a los cambios en los comportamientos de los trabajadores; no obstante, este requeriría gran cantidad de comunicaciones debido a que los agentes reciben y envían mensajes cada vez que un nuevo trabajo llega a la línea. Esta política no es muy bien vista en el sentido de que al seleccionar al mejor operador cada vez que hay un nuevo trabajo, este podría ser asignado a un operador que es uno de los mejor calificados para completar el próximo trabajo que llegará a la línea; sin embargo, para el tiempo que el próximo trabajo llegue, el operador estaría ocupado con el trabajo que recibió anteriormente.

Las opciones B) y C) representan los puntos medios entre las dos propuestas discutidas arriba. Ambas representan un nivel de optimización adecuada debido a que la mejor programación se calcula para los próximos n trabajos. Sin embargo la opción B) requiere un gran esfuerzo de comunicación, por que al igual que la opción D) todos los operadores reciben y envían información cada vez que un nuevo trabajo llega a la línea.

La información está siendo intercambiada exhaustivamente entre el programador y los operadores en la opción B) pero en la opción C) dicha información puede ser fácilmente estimada por el programador basado en los perfiles de los operadores recibidos en el inicio del turno y actualizados eventualmente. Esto se basa en una suposición aceptable de que los perfiles de los operadores no cambian mucho durante el turno. Viendo la discusión previa, la opción C) parece ser la más conveniente. Por lo que se elige esta opción.

A continuación se describe la propuesta que seleccionaron: C). Un agente conveyor (banda transportadora) se agrega a la red para controlar el flujo de trabajos sobre la banda transportadora. La lista final de agentes es:

- 1) Agente programador: uno por la línea y es encargado de distribuir los trabajos a ensamblar.
- 2) Agentes registradores: uno por operador y con la responsabilidad de monitorear la ejecución de los operadores.
- 3) Agente banda transportadora: uno por la línea y encargado de conducir los trabajos a la estación designada cuando se lo indica el programador.

Al final de cada turno la línea se deja totalmente cargada; entonces cuando los operadores en un nuevo turno llegan e introducen su registro, sus estaciones de trabajo ya tienen las piezas de un artículo que ellos pueden empezar a ensamblar. Los trabajos pueden manejarse como agentes por sí mismos. Estos agentes cargarían información acerca de ellos mismos, desde que inician en la fábrica hasta el momento en que ellos la dejan. En esta investigación el sistema es creado sin estos agentes por que: i) el nivel de complejidad y la cantidad de recursos requeridos para usar agentes adicionales es elevada; ii) la cantidad de información requerida para cada trabajo no es considerable; y iii) la optimización se logra solamente por la interacción entre los registradores y el programador.

3.1.2. INTERACCIONES DE AGENTES

Partiendo de la suposición de una línea totalmente cargada en el inicio de un turno, las interacciones entre agentes son las siguientes:

Paso 1. Cada registrador se carga en la estación donde y cuando el operador entra al inicio del turno. Después de iniciar, cada registrador automáticamente envía al programador su perfil de operador. Los perfiles contienen parámetros de las

curvas de operación de calidad y el tiempo del operador para cada tipo de trabajo que llega a la línea.

Paso 2. Mientras el operador está en su estación de trabajo, él recibirá continuamente trabajos enviados por el programador. Cada vez que un trabajo llega al lugar de espera el registrador enviará un mensaje de inicio de trabajo al programador. Este tipo de mensaje contiene una estimación del tiempo en que el operador va a terminar el tipo de trabajo que le fue asignado. Un caso particular ocurre en el inicio del turno debido a que ya hay un trabajo cargado en el espacio de trabajo, el mensaje de inicio de trabajo correspondiente se envía inmediatamente después que el registrador empieza.

Paso 3. Los mensajes de inicio de trabajo que llegan de cada registrador al programador, forman una fila de operadores que están por terminar su trabajo actual, este es llamado “la fila de los operadores próximos a desocuparse” o simplemente “fila de operadores”. El orden de esta fila se basa en la estimación de tiempo en el que los operadores van a terminar los trabajos que acaban de iniciar.

Paso 4. Además de tener una representación de la fila de operadores también se tiene una fila de los próximos trabajos entrantes. Es importante mencionar que esta fila es creada antes de que los trabajos lleguen realmente a la línea con la información de control de producción. En este paso el programador toma de la fila de operadores los próximos n_{aj} operadores que están por terminar o quienes ya terminaron pero no han recibido ningún trabajo, y también toma el mismo número de trabajos n_{aj} de la fila de trabajos entrantes, con estas dos listas, el programador optimiza, usando un algoritmo genético, la programación que determinará la mejor asignación de los próximos n_{aj} operadores para los próximos n_{aj} trabajos a ensamblar.

Paso 5. Inmediatamente después de que los trabajos entran a la línea, se envían a la estación correspondiente ya asignada por el AG.

Paso 6. Ir al paso 2.

3.2. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado que involucra sistemas multiagentes proporciona ventajas con respecto al sistema de operación actual.

En sus simulaciones lograron un promedio de 59% de decremento en el promedio de tiempo de ocio de los operadores y un 83% en la desviación estándar [9].

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PROPUESTA

En este capítulo describiremos la metodología que proponemos para la solución del problema, así como algunos de los casos que se nos presentaron durante el desarrollo del presente trabajo.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

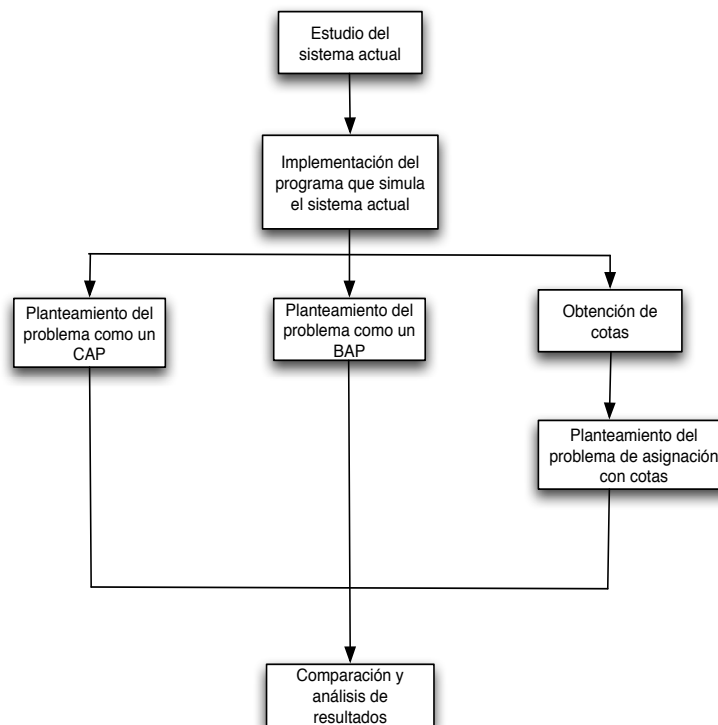


Figura 4.1: Diagrama de la metodología

Los requerimientos primordiales de la línea de ensamblaje son minimizar la cantidad de tiempo total trabajado, y al mismo tiempo, lograr un balance entre la carga de trabajo de los operadores.

4.3. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN CLÁSICO

En la forma actual de trabajar no se utiliza la información de los valores de t_{ij} , por lo que suponemos que hay una mejor manera de distribuir los trabajos haciendo uso de dicha información.

Para obtener una mejor solución que en el sistema actual, respecto al tiempo total trabajado en el turno, decidimos plantear el problema como un CAP. Denotaremos el número de artículos como n y el número de operadores como m , y los subíndices i y j para los operadores y artículos respectivamente. Para nuestro caso consideramos $n = 2m$ debido a que los operadores cuentan con dos espacios disponibles en su estación de trabajo.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \quad (4.1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 2 \quad i = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se le asigna el artículo } j \text{ al operador } i \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.4)$$

donde t_{ij} representa el tiempo esperado que tarda el operador i ensamblando el

artículo j .

Se decidió programarlo para ser resuelto mediante CPLEX en GAMS [5] utilizando el método de solución para problemas enteros mixtos, pero al revisar la literatura, nos percatamos que este problema puede ser resuelto en su formulación como problema lineal, debido a que las restricciones de que las variables de decisión sean binarias, no son necesarias, ya que de igual manera, la solución óptima será la misma. Por lo anterior decidimos resolverlo mediante el solver de gnumeric [2], el cual nos trae como beneficio, que no se necesitaría comprar algún software para la solución del problema, ya que el solver de gnumeric es gratuito, además es fácil de utilizarlo.

Después de verificar los resultados de diversos problemas, la solución dada mediante el problema de asignación clásica no es balanceada (ver figura 4.3), es decir, existe una diferencia notable entre el tiempo total trabajado por los distintos operadores.

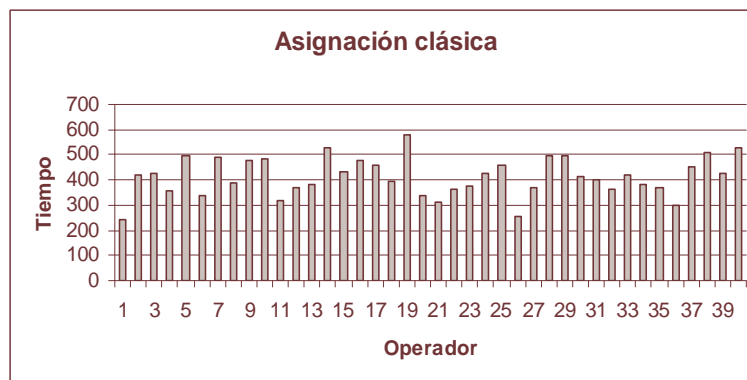


Figura 4.3: Ejemplo de una asignación clásica

Consideramos que ésta es una buena solución respecto al tiempo total trabajado ya que se reduce satisfactoriamente comparada con el tiempo total de la forma actual de laborar; sin embargo, respecto al tiempo medio por operadores

presenta la desventaja que unos operadores trabajan más tiempo que otros.

El tiempo en el que se encuentra solución óptima para cada lote mediante el CAP utilizando CPLEX [3], es menor de 0.5 segundos.

4.4. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE CUELLO DE BOTELLA (BAP)

Para el caso de la línea de producción no balanceada, como se mencionó anteriormente, es necesario plantear el problema de diferente manera, por lo cual se considero un BAP, con la diferencia de que aquí se asignan dos artículos a cada operador, siendo el objetivo minimizar el máximo valor de tiempo trabajado por operador.

El modelo que describe este problema se presenta a continuación:

$$\text{Minimizar } \max_i \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \quad (4.5)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.6)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 2 \quad i = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se le asigna al agente } i \text{ la tarea } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.8)$$

Este modelo fue modificado para ser resuelto como un problema lineal. Se encuentran diversos problemas donde sus funciones no son “sencillas” pero que están compuestas por otras que sí lo son. En este caso, un método de solución

es transformarlos en problemas más fáciles. Estos problemas pueden resolverse utilizando un método que toma ventaja especial de la estructura del problema. Para ilustrar el tipo de transformación usado, consideramos el siguiente problema compuesto:

El problema minmax ℓ_∞ definido como:

$$\text{minimizar } \max_x \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \quad (4.9)$$

donde las f_i son las funciones “sencillas” [13].

Este problema puede ser transformado en un problema “fácil” introduciendo una nueva variable z , la cual es una cota superior sobre todas las funciones f_i . Un problema equivalente a 4.9 es entonces:

$$\text{minimizar } z \quad (4.10)$$

$$\text{sujeto a: } f_i(x) \leq z \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (4.11)$$

Una explicación gráfica de (4.9) se puede ilustrar en la figura 4.4, donde las líneas de colores representan las f_i , las líneas en negro representan la función $\max\{f_i(x)\}_{i=1,2,\dots,m}$ y el punto óptimo que es el que se desea encontrar está representado por *.

En el presente trabajo, hicimos uso de la transformación anterior, por lo que el

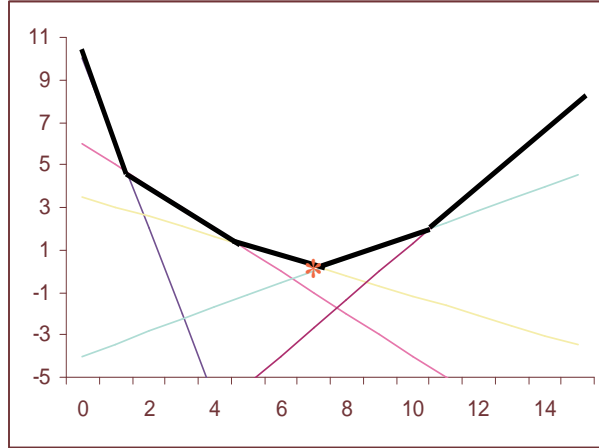


Figura 4.4: Visualización gráfica del minmax ℓ_∞

modelo de 4.5 a 4.8 resulta de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar: } z \quad (4.12)$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq z \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.13)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.14)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 2 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.15)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se le asigna al agente } i \text{ la tarea } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.16)$$

Este modelo nos da como resultado el menor valor de z para el cual el tiempo trabajado por los operadores puede ser acotado superiormente.

Este problema 4.12-4.16, se formuló para ser resuelto haciendo uso de CPLEX y tiene como desventaja el tiempo que se emplea en su solución, por lo que se establece un GAP relativo de 10 %, sólo para encontrar una solución factible, este valor de GAP

representa una tolerancia relativa sobre la diferencia entre el valor de la función objetivo de la mejor solución entera actual (BF) y la mejor solución entera de los nodos restantes (BP) del método de ramificar y acotar que utiliza CPLEX para la búsqueda de soluciones (para más información ver [4]). GAMS detiene su búsqueda cuando se cumple:

$$\frac{|BP - BF|}{|BP|} < \text{OptCR}, \quad (4.17)$$

donde OptCR es un parámetro que se proporciona dentro del modelo en GAMS, para nuestro caso OptCR=0.10, que representa el 10% de GAP que estamos permitiendo.

Como ventaja de utilizar el BAP para realizar la distribución de trabajos podemos mencionar que se logra balancear el tiempo trabajado por cada uno de los operadores (ver figura 4.5).

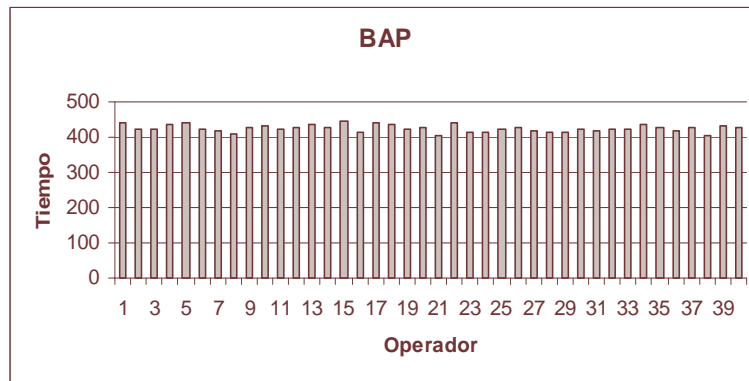


Figura 4.5: Ejemplo de una asignación de cuello de botella

4.5. PROBLEMA DE ASIGNACIÓN CON COTAS

Como resultado del tiempo excesivo en el uso del método BAP y el no balance de tiempo por operador en el método CAP se propone el uso de cotas o límites para el tiempo trabajado por cada operador, debido a que la mejor asignación no

es balanceada y la asignación de cuello de botella requiere demasiado tiempo para resolverse; la forma como proponemos encontrar estas cotas es:

- a) Obtener el valor esperado de ensamblar dos artículos, mediante la distribución hipergeométrica multivariada. Ver sección 4.5.1

- b) Calcular los valores extremos de tiempos mínimo y máximo de asignación de dos trabajos para un lote dado, S^m y S^M . En la sección 4.5.2 se proporciona una explicación de este proceso.

4.5.1. COTAS MEDIANTE DISTRIBUCIÓN HIPERGEOMÉTRICA MULTIVARIADA

Para obtener las cotas por operador en cada lote, necesitamos saber el tiempo esperado que estos pueden tardar en ensamblar dos artículos dados; el valor esperado es la suma de la probabilidad de cada suceso multiplicada por su valor; por lo que necesitamos encontrar el valor de la probabilidad de que ocurra cada asignación de todas las combinaciones posibles de dos artículos, para obtener este valor hicimos uso de la distribución hipergeométrica multivariada, la cual nos proporciona la probabilidad de asignación de artículos considerando clases distintas.

Si en una población de tamaño N , hay k_1 elementos de tipo 1, k_2 elementos del tipo 2, ..., k_c elementos del tipo c (se tiene la población dividida en c grupos o categorías). Seleccionamos una muestra de tamaño n y definimos las variables aleatorias y_1, y_2, \dots, y_c como el número de elementos de los grupos 1, 2, ..., c respectivamente en la muestra [7].

Su función de probabilidad está dada por:

$$f(y_1, y_2, \dots, y_c) = \frac{\binom{k_1}{y_1} \binom{k_2}{y_2} \dots \binom{k_c}{y_c}}{\binom{N}{n}} \quad (4.18)$$

donde $\binom{a}{b}$ es el número de subconjuntos con b elementos de un conjunto con a elementos y su fórmula se describe por:

$$\binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!} \quad (4.19)$$

Por ejemplo, si tenemos un lote de tamaño $N = 10$ compuesto por 3 artículos de la clase 1, 1 de la clase 2, 2 de la clase 3, 3 del tipo 4 y 1 artículo de la clase 5, entonces: $k_1 = 3, k_2 = 1, k_3 = 2, k_4 = 3$ y $k_5 = 1$ y deseamos obtener la probabilidad de tener $n = 2$ artículos de la clase 1 sería:

$$f(2, 0, 0, 0, 0) = \frac{\binom{3}{2} \binom{1}{0} \binom{2}{0} \binom{3}{0} \binom{1}{0}}{\binom{10}{2}} = \frac{3}{45} \quad (4.20)$$

Si queremos la probabilidad de tener 1 artículo de la clase 3 y 1 de la clase 4:

$$f(0, 0, 1, 1, 0) = \frac{\binom{3}{0} \binom{1}{0} \binom{2}{1} \binom{3}{1} \binom{1}{0}}{\binom{10}{2}} = \frac{6}{45} \quad (4.21)$$

Para obtener el tiempo esperado de ensamblar dos artículos cualesquiera,

denotemos el valor de la función de probabilidad hipergeométrica multivariada como:

$$g(i, j) = f(y_1, y_2, \dots, y_c), \quad (4.22)$$

donde $y_k \in \{0, 1, 2\}$, con $y_k = 0$ para $k \neq i, j$ y $y_i = y_j \neq 0$; y cuando $j = i$ entonces $y_i = y_j = 2$.

Para todos nuestros casos, $n = 2$ ya que deseamos obtener el tiempo esperado de ensamblar dos artículos, por lo tanto, no existen combinaciones de 2 elementos con artículos de más de 2 clases; en este formato si $i = j$, entonces $y_i = y_j = 2$, es decir, se tienen 2 artículos de la misma clase, la clase i y el resto $y_k = 0$, para $k \neq i$; ver ejemplo en la ecuación (4.20). Si $i \neq j$, entonces $y_i = 1, y_j = 1$ y el resto $y_k = 0$, para $k \neq i, j$, es decir, se tienen 2 artículos de clases diferentes, uno de la clase i y otro de la clase j , como en el ejemplo (4.21). De esta manera, la función hipergeométrica la podemos representar como:

$$g(i, j) = \frac{\binom{k_1}{y_1} \binom{k_2}{y_2} \dots \binom{k_c}{y_c}}{\binom{N}{2}} \quad i, j = 1, 2, \dots, c \quad (4.23)$$

Bajo esta presentación, definimos \bar{t} como el valor esperado del tiempo medio de ensamblar 2 artículos de un lote de tamaño N y se representa como:

$$\bar{t} = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^c (\bar{t}_i + \bar{t}_j) g(i, j) \quad (4.24)$$

donde \bar{t}_i y \bar{t}_j son los tiempos medios de ensamblar el artículo de la clase i y j respectivamente.

Esta función del valor esperado mostrada en la ecuación (4.24) se implementó

para calcularse en Excel [18] , la cual nos da como resultado el valor del tiempo esperado de ensamblar dos artículos. Haremos uso de este valor \bar{t} y un parámetro extra, al cual le llamaremos tolerancia permitida τ , que representa la diferencia permitida de tiempo trabajado entre cualquier par de trabajadores. Al obtener el valor \bar{t} haciendo uso de la distribución de probabilidad antes mencionada, definimos un rango $\bar{t} \pm \tau/2$ que se agrega como restricciones tal como se presenta en el siguiente modelo en las ecuaciones (4.28) y (4.29).

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \quad (4.25)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.26)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 2 \quad i = 1, \dots, m \quad (4.27)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq \bar{t} + \tau/2 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.28)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \geq \bar{t} - \tau/2 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.29)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se le asigna al agente } i \text{ la tarea } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.30)$$

La formulación matemática es muy parecida al problema de asignación clásico, pero este modelo tiene dos restricciones extras (4.28) y (4.29) que aseguran que el tiempo total trabajado por operador en cada lote se encuentre entre esas cotas de tiempo.

Nos encontramos con algunos ejemplos en los cuales aún con este rango no se encuentra solución factible, debido a que no se encuentra solución en la que la diferencia de tiempo trabajado sea menor que τ , para estos casos se puede utilizar

la siguiente propuesta.

4.5.2. COTAS MEDIANTE S^m Y S^M

Debido a que a lo largo de este trabajo se presentaron ejemplos en los que no se podía utilizar solamente la distribución hipergeométrica multivariada y el valor τ de tolerancia permitida, se analizaron estos ejemplos y se propone lo siguiente:

Suponemos que tenemos los siguientes datos para un lote: 69 artículos de la clase 1; 7 de la clase 2 y 4 artículos de la clase 3; el tiempo medio esperado para ensamblar un artículo de la clase 1 es 19.68 unidades de tiempo; para ensamblar uno de la clase 2 es de 7.69 y para el artículo de la clase 3 la media es de 19.64; utilizamos las medias de cada clase de artículo para calcular las S^m y S^M . Como queremos balancear la carga de trabajo, lo que proponemos es asignar lo más equilibrado posible, empezando a asignar uno de los artículos más difíciles (con mayor tiempo medio) con uno de los más fáciles (menor tiempo medio), es decir, en este ejemplo empezamos a asignar artículos de la clase 1 con artículos de la clase 2, con lo que nos da una suma de tiempo esperado igual a $S1 = 27,37$ unidades de tiempo, después haríamos la asignación de los artículos restantes de la clase 1 con los artículos de la clase 3, lo que nos da un tiempo esperado de $S2 = 39,32$; al final nos resta solamente asignaciones de dos artículos de la clase 1, lo que nos da un tiempo esperado de $S3 = 39,36$. Con estos datos vamos a elegir $S^m = 27,37$ y $S^M = 39,36$. Ahora vamos a considerar 3 casos:

- Si $S^m < \bar{t} < S^M$, vamos a elegir $c_i = S^m - \delta$ como cota inferior y $c_s = S^M + \delta$ como cota superior.
- Si $\bar{t} > S^M$ entonces la cota inferior es $c_i = S^m - \delta$ y la cota superior es $c_s = \bar{t}$
- Si $\bar{t} < S^m$ escogemos la cota inferior como $c_i = \bar{t}$ y la cota superior como $c_s = S^M + \delta$

El modelo matemático se muestra a continuación:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \quad (4.31)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.32)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 2 \quad i = 1, \dots, m \quad (4.33)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq c_s \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.34)$$

$$\sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \geq c_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.35)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se le asigna al agente } i \text{ la tarea } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.36)$$

Para nuestras instancias consideramos $\delta = 2$, debido a la forma en que fueron generados los datos de las medias por operador con respecto a la media de los artículos; se usa un valor de $\varepsilon \in (-1, 1)$ para cada operador que se le suma al valor del tiempo medio por artículo, por lo que la máxima diferencia entre los tiempo medios por operador es de 2 unidades.

Es importante mencionar que la aparición de la segunda opción propuesta es sólo para un tipo de instancias, aquellas en las cuales la proporción de un tipo de artículo es predominante con respecto al total de artículos del lote es decir, cuando se tiene un lote con una proporción entre 75 % y 90 % de un solo tipo de artículo.

Para calcular los valores de S^m y S^M se necesitan las proporciones de cada lote y las medias de los artículos que se incluyen en dicho lote.

La ventaja de este proceso es que el procedimiento para encontrar las cotas, por cualquiera de los dos métodos, no es tardado; el programa que resuelve el problema de asignación con cotas es GAMS mediante CPLEX, el cual tampoco necesita mucho tiempo para encontrar la solución, además que se logra un mejor balance entre el tiempo total trabajado comparado con el problema de asignación clásico (ver figura 4.6). La desventaja es que se necesita un software comercial. Además aquí se deben obtener las cotas para cada lote que se va a ensamblar.

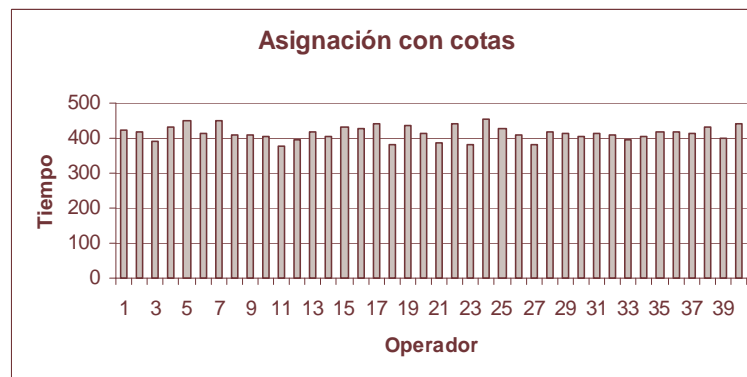


Figura 4.6: Ejemplo de una asignación con cotas

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Como se mencionó anteriormente en la sección 1.1, los operadores cuentan con dos espacios disponibles en su estación de trabajo, por lo que decidimos considerar los lotes de tamaño igual al doble del número de operadores.

Además existen 40 diferentes clases de artículos, la orden de los grupos y su tamaño son determinados la noche anterior al turno actual. Razón por la cual determinamos generar instancias que representen diversas maneras en que puede variar un pedido.

En este capítulo describiremos las instancias con las que estuvimos experimentando así como los distintos programas que desarrollamos a lo largo del presente trabajo.

5.1. DESCRIPCIÓN DE EJEMPLOS

Luego de analizar a fondo las diferentes maneras en que puede existir un pedido y debido a que no contamos con datos reales, decidimos generar instancias de la siguiente manera:

- Ejemplos chicos, de 5 operadores y 10 artículos por lote, estos fueron generados debido a que es más fácil realizar diversas observaciones sobre estos problemas.

Dentro de estos ejemplos consideramos problemas con 5 y 10 clases de artículos, indicadas respectivamente en el número (de dos cifras) que aparece enseguida de la letra en el nombre de cada una de los ejemplos.

Una descripción más a fondo de estos ejemplos:

✓ e0510-1, e0510-2 son ejemplos con a lo más 50% de artículos de una sola clase por cada lote;

✓ e0510-3, e0510-4, e0510-5 son ejemplos con a lo más 30% artículos de un solo tipo; todos estos son lotes que consideran únicamente 5 clases de artículos diferentes;

✓ e1010-1, e1010-2, consideran un artículo de cada tipo;

✓ e1010-3 sólo permite hasta 30% de un tipo de artículo;

✓ e1010-4, e1010-5 permite hasta 60% de una clase de artículo por lote.

- Ejemplos grandes de 40 operadores y 80 artículos por lote, estos ya son los casos de tamaño real.

Aquí se consideraron las 40 clases de artículos diferentes, pero es importante mencionar que en algunos ejemplos no necesariamente se incluyen artículos de todas las clases, esto debido a la proporción de cada tipo de artículo dentro de un lote.

Cabe destacar que los siguientes ejemplos incluyen 17 lotes cada una, debido a que en promedio esta cantidad de lotes son los que se alcanzan a ensamblar durante una jornada laboral completa.

✓ r40801-1, r40801-2 y r40801-3, son ejemplos con a lo más 5 artículos de cada clase;

✓ r40802-1, r40802-2 y r40802-3 son lotes que contienen entre 15 y 25 artículos de cada clase;

✓ r40803-1, r40803-2 y r40803-3 son ejemplos con 2 artículos de cada clase;

✓ r40804-1, r40804-2 y r40804-3 donde todos los lotes incluyen sólo un tipo de artículo, es decir se hace un tipo de artículo durante toda la jornada laboral;

✓ r40805-1, r40805-2 y r40805-3 son ejemplos donde cada lote consta de un sólo tipo de artículo, pero difiere la clase para cada lote;

✓ r40806-1, r40806-2 y r40806-3 representan ejemplos con un porcentaje entre 75 % y 90 % de una clase de artículo, es decir, pedidos con 60 o 70 artículos de una clase en especial.

Para una mejor visualización de las proporciones de cada uno de los ejemplos mencionados, se incluyen las tablas en el Apéndice A; la suma de cada columna en las tablas es de 10 y 80 que son los artículos que se ensamblan por cada lote en ejemplos chicos y grandes respectivamente; mientras que cada fila representa la clase de artículos.

Los tiempos esperados para cada clase de artículo varían entre 7 y 20 minutos [1] y se muestran en la tabla A.24 del Apéndice A.

Para obtener los tiempos esperados por operador se generó un valor $\varepsilon \in (-1, 1)$ para cada operador, y este valor se le suma al tiempo esperado de cada clase de artículo; se eligió ε en este intervalo debido a que si lo ampliamos, nos desviamos demasiado de los datos de los tiempos esperados por clase de artículo.

Con lo anterior ya contamos con una diversidad de tiempos esperados según la clase de artículo por operador.

Es importante mencionar que los ejemplos 40803-1, r40803-2 y r40803-3, tienen las mismas proporciones, las diferencias entre éstos radican en que se consideraron los diferentes operadores de cada turno, es decir, se generaron tiempos esperados distintos para los operadores en cada una de estos ejemplos. Lo mismo pasa en los ejemplos r40806-1, r40806-2 y r40806-3.

5.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS

Con la aparición de la computadora y los avances de la tecnología se hacen cada vez más útiles las herramientas de programación para ayudarnos a resolver eficientemente algunos de los problemas que se presentan en la actualidad.

Durante el desarrollo de este trabajo hacemos uso de programas que implementamos, algunos en lenguaje C y otros en GAMS o directamente en CPLEX.

Es importante destacar que las deducciones que se expresan en este trabajo se

realizan únicamente considerando los tiempos esperados, sin tomar en cuenta una desviación existente en dichos tiempos al momento de efectuar nuestras propuestas en tiempo real.

5.2.1. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL

En la descripción del sistema actual descrito en la sección 1.1 se explica la asignación de los trabajos conforme van terminando los operadores y de acuerdo a como están acomodados en la línea de ensamblaje; por esto pensamos que hay una mejor forma de distribuir los trabajos a los operadores de manera que se logre minimizar el tiempo total trabajado considerando los tiempos esperados de ensamblar cada clase de artículo.

Para la representación del sistema actual se implementó un programa en lenguaje C, llamado "`simulación.cpp`", el cual lee como datos de entrada un archivo de texto; para mostrar un ejemplo ver figura 5.1 que es una instancia donde tenemos 5 operadores, 10 artículos por ensamblar y 3 lotes.

Los primeros tres grupos de datos representan los tiempos esperados para que cada operador termine cada tipo de artículo de cada uno de los lotes, en este caso cada columna corresponde a cada operador, cada fila a los artículos y cada grupo de datos a los lotes.

Los números que están después de las tres tablas, son algunos (7) de los diferentes ordenamientos en que pueden estar acomodados los operadores. Es decir, si enumeramos a los operadores del 1 al 5 podemos tenerlos en una forma si está primero el operador 1, luego el 2, 3, 4 y finalmente el operador número 5; pero también obtenemos resultados diferentes si está primero el operador 5, luego el 4, 3,

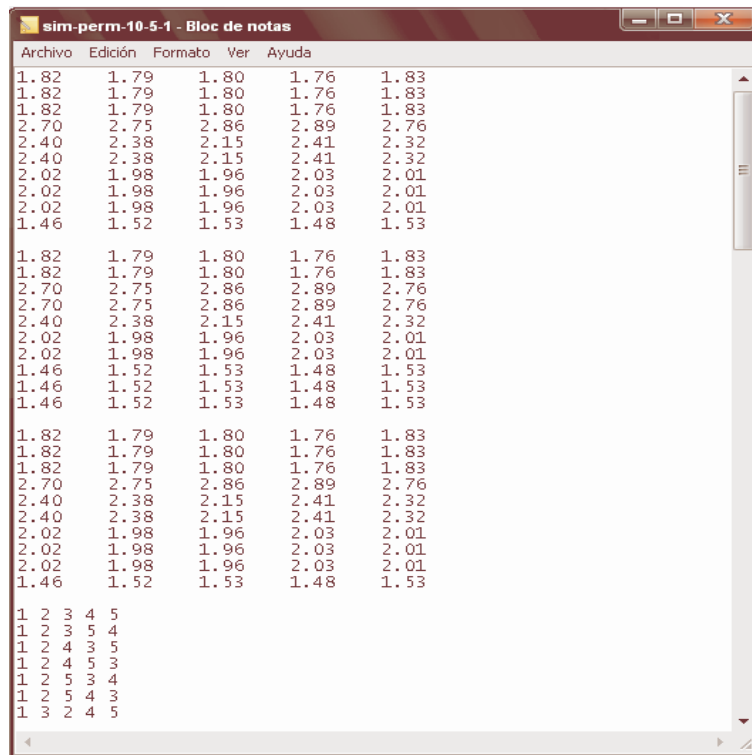


Figura 5.1: Archivo de entrada para `simulación.cpp`

2 y por último el operador con número 1.

Estos distintos ordenamientos se utilizaron para obtener no solo un caso sino también para observar los resultados en caso de que no estuvieran acomodados de una única manera, en este caso para 5 operadores se tienen $5! = 120$ maneras diferentes, pero conforme crece el número de operadores crece este valor, por lo que decidimos hacerlo sólo para cierta cantidad de diferentes formas, esto es, 120 maneras distintas en que los operadores se acomodan para las instancias de 5 operadores y $7! = 5040$ para las de 40 operadores.

En el cuadro 5.1 se presenta un breve algoritmo que describe lo que realiza el programa.

A continuación se describen los pasos que realiza el programa `simulación.cpp`

1. Leer archivo de entrada.
2. **do**{
3. Hacer diferentes ordenamientos de los datos de entrada
4. Se asigna el primer lote (ya que este ya se sabe de que manera se va a repartir)
5. Para los otros lotes (ordenar a los trabajadores según como se van desocupando en orden creciente).
6. Repartir estos lotes.
7. Hacer un reporte de salida.
8. **}while** (fin de la simulación).

Tabla 5.1: Algoritmo de `simulación.cpp`

ilustrado en un ejemplo. Empezando por mostrar los parámetros iniciales del programa.

```
· Parámetros
#define num_articulos 10 //número de artículos por lote
#define num_operadores 5 //número de operadores
#define num_lotes 3 //número de lotes
#define iter 120 //número de iteraciones permitidas
#define permutaciones 120 //número de simulaciones distintas
```

El número de permutaciones se refiere a los diferentes ordenamientos que se puede leer desde el archivo de entrada, en nuestros casos es de 120 o 5040 según sea el caso del tamaño de la instancia; mientras que el número de iteraciones puede ser menor o igual que el número de permutaciones, el programa se puede detener antes de que se corran todas las permutaciones distintas que se proporcionaron en el archivo de entrada, dándole el número de corridas que queremos ejecutar en el parámetro número de iteraciones. Para nuestras instancias de 5 operadores permitimos que se corrieran las 120 permutaciones, pero para el caso de 40 operadores lo dejamos correr hasta 500 iteraciones solamente de las 5040 proporcionadas.

· **Asignación del primer lote.** Actualmente ellos reparten en un inicio en orden según como están acomodados los operadores, al primer operador le asignan el primer artículo, el segundo al segundo y así sucesivamente, cuando ya todos los

operadores tienen un artículo entonces reparten el segundo artículo del primer lote de la misma manera, ver figura 5.2:

art/op	1	2	3	4	5
1	1.82	1.79	1.8	1.76	1.83
2	1.82	1.79	1.8	1.76	1.83
3	1.82	1.79	1.8	1.76	1.83
4	2.7	2.75	2.86	2.89	2.76
5	2.4	2.38	2.15	2.41	2.32
6	2.4	2.38	2.15	2.41	2.32
7	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
8	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
9	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
10	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53

Figura 5.2: Asignación del primer lote

· **Asignación de los siguientes lotes.** Para asignar los siguientes lotes se deben ordenar los tiempos según como los operadores van terminando su primer artículo armado, ya que como se mencionó anteriormente, al terminar de armar un artículo, jalen el que tienen en el espacio de espera e inmediatamente se le manda otro artículo para que ocupe este espacio.

En este caso, los operadores terminan su primer artículo en el siguiente orden: el operador 2 termina primero, luego el operador 3, le sigue el 1, después de éste se espera que termine el operador número 5 y l final termina el operador número 4; en este mismo orden es como se van a repartir los primeros artículos del segundo lote. Y así se continúan repartiendo los artículos siguientes, ordenando según el tiempo esperado en que terminan sus artículos.

Para este ejemplo, la asignación del segundo lote sería como se ve en 5.3.

Así continua el programa hasta alcanzar el número de iteraciones que se le introdujo como parámetro.

Para la salida del programa `simulación.cpp` se decidió que se hiciera en dos archivos, uno contiene la lista donde dice cuales artículos le tocaron a cada operador en cada lote, así como su tiempo de terminación esperado, como se puede ver en la

art/op	1	2	3	4	5
1	1.82	1.79	1.8	1.76	1.83
2	1.82	1.79	1.8	1.76	1.83
3	2.7	2.75	2.86	2.89	2.76
4	2.7	2.75	2.86	2.89	2.76
5	2.4	2.38	2.15	2.41	2.32
6	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
7	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
8	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53
9	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53
10	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53

Figura 5.3: Asignación del segundo lote

figura 5.4. En el otro se incluyen unas listas donde aparecen los tiempos totales por operador en cada lote y su total como en 5.5. Además nos da como salida cual fue la mejor corrida realizada, es decir, la que tiene menor tiempo total trabajado.

```

desc10-5-1 - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

lote artículo operador tiempo
1 1 1 1.82
1 2 2 1.79
1 3 3 1.80
1 4 4 2.89
1 5 5 2.32
1 6 6 2.40
1 7 7 1.98
1 8 8 1.96
1 9 9 2.03
1 10 10 1.53
2 1 1 1.79
2 2 2 1.80
2 3 3 1.76
2 4 4 2.70
2 5 5 2.76
2 6 6 2.41
2 7 7 2.01
2 8 8 1.96
2 9 9 1.52
2 10 10 1.48
3 1 1 1.46
3 2 2 1.79
3 3 3 1.80
3 4 4 1.76
3 5 5 2.70
3 6 6 2.76
3 7 7 2.41
3 8 8 2.01
3 9 9 1.96
3 10 10 1.53
4 1 1 1.82
4 2 2 1.79
4 3 3 1.80
4 4 4 2.89
4 5 5 2.32
5 1 1 2.40
5 2 2 2.03
5 3 3 1.98
5 4 4 1.96
5 5 5 1.53

lote artículo operador tiempo
1 1 1 1.82
1 2 2 1.79
1 3 3 1.80
1 4 4 2.89
1 5 5 2.32
    
```

Figura 5.4: Reporte1 de salida

5.2.2. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN

Como se mencionó en la sección anterior debido a la forma actual de trabajar, se piensa que existe una mejor forma de asignar los trabajos a los operadores,

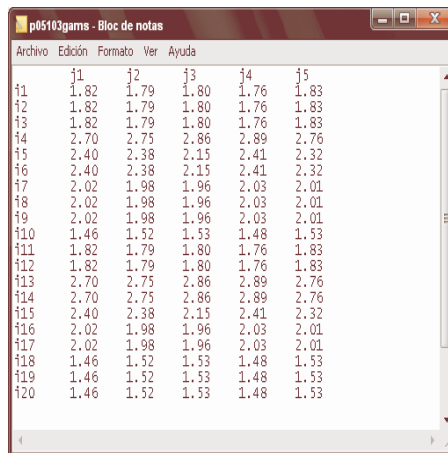
	A	B	C	D	E
1					
2	4.22	4.16	5.1		
3	3.77	3.31	3.77		
4	3.76	3.76	3.76		
5	4.92	3.89	3.79		
6	3.85	4.77	3.85		
7	20.52	19.89	20.27		
8					
9	4.22	4.16	5.1		
10	3.77	3.31	3.77		
11	3.76	3.76	3.76		
12	4.92	3.89	3.79		
13	3.85	4.77	3.85		
14	20.52	19.89	20.27		
15					
16	4.22	4.16	5.1		
17	3.77	3.31	3.77		
18	3.76	3.76	3.76		
19	4.92	3.89	3.79		
20	3.85	4.77	3.85		
21	20.52	19.89	20.27		
22					
23	4.22	4.16	5.1		
24	3.77	3.31	3.77		
25	3.76	3.76	3.76		
26	4.92	3.89	3.79		

Figura 5.5: Reporte2 de salida

tomando en cuenta los tiempo esperados de ensamblar cada clase de artículo para minimizar el tiempo total trabajado. La formulación de este problema se presentó en la sección 4.3.

Para la solución del problema de asignación, decidimos hacer un programa primeramente en GAMS, para ser resuelto mediante CPLEX. Este programa también recibe un archivo de entrada parecido al de `simulación.cpp` pero sin las permutaciones que van al final del archivo, además que esta programado para resolver problemas de dos en dos lotes por lo que estás tablas deben ir de dos en dos y con los índices para que los lea GAMS, un ejemplo se muestra en 5.6

Este programa también nos regresa un archivo de salida el cual contiene la asignación óptima de artículos a operadores, por lo que este archivo está compuesto por 0's y 1's solamente. Es decir, despliega la matriz de asignación. La cual se utiliza para calcular los tiempos esperados de dicha asignación con ayuda de Excel.



	i1	i2	i3	i4	i5
f1	1.82	1.79	1.80	1.76	1.83
f2	1.82	1.79	1.80	1.76	1.83
f3	1.82	1.79	1.80	1.76	1.83
f4	2.70	2.75	2.86	2.89	2.76
f5	2.40	2.38	2.15	2.41	2.32
f6	2.40	2.38	2.15	2.41	2.32
f7	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
f8	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
f9	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
f10	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53
f11	1.82	1.79	1.80	1.76	1.83
f12	1.82	1.79	1.80	1.76	1.83
f13	2.70	2.75	2.86	2.89	2.76
f14	2.70	2.75	2.86	2.89	2.76
f15	2.40	2.38	2.15	2.41	2.32
f16	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
f17	2.02	1.98	1.96	2.03	2.01
f18	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53
f19	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53
f20	1.46	1.52	1.53	1.48	1.53

Figura 5.6: Archivo de entrada para GAMS

Después de analizar a fondo el problema, nos dimos cuenta que se pueden eliminar las restricciones de que las variables de decisión sean binarias, por lo que se resolvió en *gnumeric* haciendo uso de su solver, lo cual sólo necesita ingresar la tabla de datos e incluir en el solver o resolvidor las restricciones que se requieren, el cual es muy similar al solver de Excel. No utilizamos el solver de Excel ya que no podía resolver las instancias grandes con las que estábamos trabajando.

Los resultados obtenidos establecen una clara ventaja, en cuanto a tiempo total utilizado, del método de asignación clásica con respecto al procedimiento actual. La discusión y conclusiones de la aplicación de estos métodos se verá en el capítulo 6.

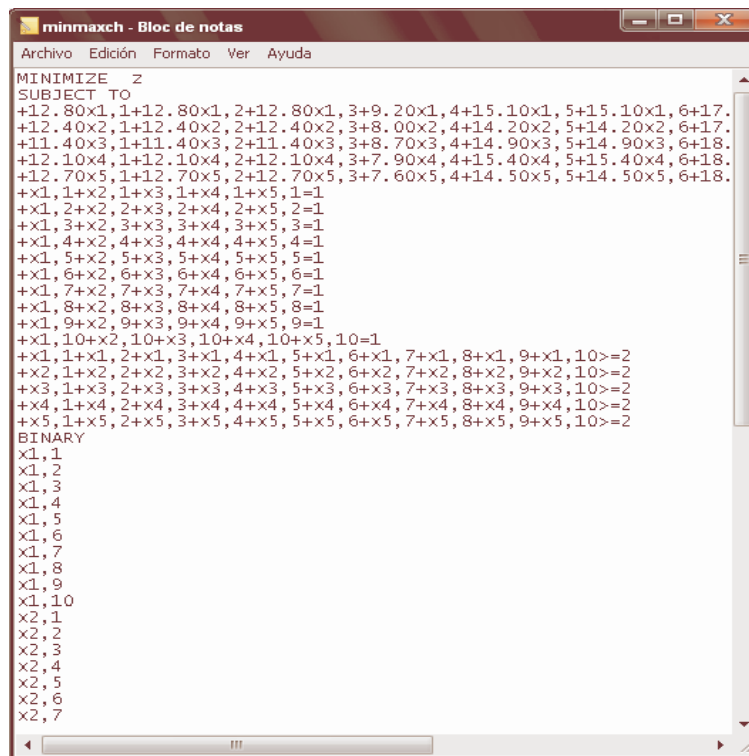
Como vimos anteriormente en la sección 4.3, los resultados del problema de asignación son no balanceados respecto a tiempo por operador, por lo que decidimos buscar un planteamiento que resolviera este inconveniente. Un método es el relacionado con la solución del Problema de Asignación de Cuello de Botella (BAP).

5.2.3. SOLUCIÓN DEL BAP

Con el planteamiento de este problema deseamos encontrar una solución más balanceada que la del problema de asignación clásica. La formulación del BAP se puede ver en la sección 4.4.

Para resolver el problema en cuestión, se implementó un programa en lenguaje C, el cual recibe como entrada el archivo que se muestra en la figura 5.1, con la diferencia que aquí sólo se introduce un lote a la vez, este programa escribe en un archivo de salida con formato `.lp` el modelo matemático mostrado de (4.12) a (4.16) el cual incluye la transformación del modelo original para ser resuelto por CPLEX en forma lineal.

Un ejemplo de este archivo se puede ver en la figura 5.7:



```

minmaxch - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
MINIMIZE z
SUBJECT TO
+12.80x1,1+12.80x1,2+12.80x1,3+9.20x1,4+15.10x1,5+15.10x1,6+17.
+12.40x2,1+12.40x2,2+12.40x2,3+8.00x2,4+14.20x2,5+14.20x2,6+17.
+11.40x3,1+11.40x3,2+11.40x3,3+8.70x3,4+14.90x3,5+14.90x3,6+18.
+12.10x4,1+12.10x4,2+12.10x4,3+7.90x4,4+15.40x4,5+15.40x4,6+18.
+12.70x5,1+12.70x5,2+12.70x5,3+7.60x5,4+14.50x5,5+14.50x5,6+18.
+x1,1+x2,1+x3,1+x4,1+x5,1=1
+x1,2+x2,2+x3,2+x4,2+x5,2=1
+x1,3+x2,3+x3,3+x4,3+x5,3=1
+x1,4+x2,4+x3,4+x4,4+x5,4=1
+x1,5+x2,5+x3,5+x4,5+x5,5=1
+x1,6+x2,6+x3,6+x4,6+x5,6=1
+x1,7+x2,7+x3,7+x4,7+x5,7=1
+x1,8+x2,8+x3,8+x4,8+x5,8=1
+x1,9+x2,9+x3,9+x4,9+x5,9=1
+x1,10+x2,10+x3,10+x4,10+x5,10=1
+x1,1+x1,2+x1,3+x1,4+x1,5+x1,6+x1,7+x1,8+x1,9+x1,10>=2
+x2,1+x2,2+x2,3+x2,4+x2,5+x2,6+x2,7+x2,8+x2,9+x2,10>=2
+x3,1+x3,2+x3,3+x3,4+x3,5+x3,6+x3,7+x3,8+x3,9+x3,10>=2
+x4,1+x4,2+x4,3+x4,4+x4,5+x4,6+x4,7+x4,8+x4,9+x4,10>=2
+x5,1+x5,2+x5,3+x5,4+x5,5+x5,6+x5,7+x5,8+x5,9+x5,10>=2
BINARY
x1,1
x1,2
x1,3
x1,4
x1,5
x1,6
x1,7
x1,8
x1,9
x1,10
x2,1
x2,2
x2,3
x2,4
x2,5
x2,6
x2,7

```

Figura 5.7: Archivo de entrada para CPLEX

5.2.4. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN CON COTAS

Debido a que se requiere demasiado tiempo para encontrar la solución óptima al problema de asignación de trabajos mediante el BAP, proponemos encontrar la solución mediante una formulación parecida al CAP pero introduciendo cotas para el tiempo trabajado por los operadores en cada lote.

Para encontrar las cotas se proponen dos métodos, según sea el caso de la instancia a resolver; la primera opción es encontrar el tiempo esperado de ensamblar dos artículos haciendo uso de la distribución hipergeométrica multivariada como se explicó en la sección 4.5.1, esta opción se utilizó con todas las instancias, excepto aquellas donde las proporciones de un solo tipo de artículo forman entre el 75% y 90% del lote a ensamblar, esto debido a que en dichas instancias el valor de las cotas obtenidas por medio de la distribución hipergeométrica multivariada y el valor de tolerancia τ no funcionan como se esperaba, ya que las proporciones del lote no permiten una tolerancia de τ unidades entre el tiempo trabajado por los operadores; por esta razón surge la segunda opción propuesta que utiliza los valores inferior y superior de los tiempos medios por artículo para calcular las cotas, como se describió en la sección 4.5.2.

La primera opción fue hecha en un archivo de excel donde sólo se piden las medias y las proporciones de las clases de artículos y nos despliega el valor esperado del tiempo de ensamblado de 2 artículos; para la otra opción se realizó un programa en lenguaje C el cual lee las proporciones y las medias y calcula los valores de S^m y S^M (ver sección 4.5.2). Estos valores obtenidos para acotar los tiempos por operador, se introducen dentro del programa en GAMS que resuelve los modelos matemáticos de (4.25)-(4.29) descritos en las secciones 4.5.1 y 4.5.2.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta el análisis de resultados, se muestra una comparación entre los distintos métodos utilizados.

6.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para lograr una evaluación y comparación de los procedimientos actuales y los métodos de asignación propuestos (CAP, BAP y Asignación con cotas BoAP), en relación a los tiempos totales empleados, al desbalance en tiempo entre operadores y al tiempo de computo, mostraremos los resultados para las instancias grandes, las de 40 operadores y 80 artículos por lote, ya que las instancias pequeñas se utilizaron para tener una visión general de la problemática a tratar.

Cabe mencionar que los tiempos promedios mostrados son por operador, si se requiere obtener la diferencia del tiempo total según los métodos basta con multiplicar dicho tiempo por 40, que es el número de operadores.

Los resultados obtenidos se muestran en tablas cuya primera columna indica el método de asignación empleado, la segunda columna indica el tiempo medio de los tiempos esperados de los 40 operadores, la tercer columna muestra la desviación estándar de los tiempos esperados de los 40 operadores y finalmente la última

r40801-1 Método	Media por operador (min)	Desviación estándar (min)	Tiempo total de cómputo (s)
Simulación	442.1	24.8	-
CAP	412.3	76.4	3.42
BAP	424.9	10.3	5021.31
BoAP	415.0	19.6	4.25

Tabla 6.1: Resultados de r40801-1

columna muestra el tiempo total de cómputo que requiere cada uno de los métodos para encontrar solución.

Es importante destacar que el tiempo de cómputo se obtiene de resolver las instancias mediante CPLEX.

Como se mencionó anteriormente en la sección 4.4, el problema resuelto mediante el BAP no encuentra solución óptima debido a que el tiempo que requiere para llegar a ella es demasiado grande, por lo que el tiempo que se muestra en estas tablas de resultados (en la fila del BAP) son los tiempos que tardó para llegar al GAP del 10% que es el intervalo de optimalidad relativa, es decir, la diferencia relativa entre la mejor solución factible y la mejor cota inferior encontradas por CPLEX.

Los tiempos de cómputo mostrados en la última columna de las tablas de resultados representan el tiempo máquina requerido para resolver los 17 lotes en total.

Para la instancia r40801-1 que se describe en la tabla A.10 del Apéndice A, se tienen a lo más 5 artículos (cada columna suma 80 artículos) de cada clase en cada lote (17 en total). Los resultados que se muestran en la tabla 6.1 indican que el mejor método para asignar los trabajos, en cuanto a tiempo trabajado por operador y por tanto en tiempo total trabajado, es el CAP, que presenta el menor tiempo medio por operador; pero como se puede ver, es el que tiene la mayor desviación

estándar, indicando que dicha solución es la más desbalanceada en cuanto a carga de trabajo por operador.

El mejor método propuesto para realizar la asignación en cuanto a carga de trabajo es el BAP, ya que es el que tiene menor desviación estándar entre los tiempos de los operadores, pero este método es el peor en cuanto a tiempo de cómputo necesario para encontrar la solución.

La asignación de trabajos mediante el problema de asignación con cotas se encuentra como punto medio en cuanto al tiempo medio y carga de trabajo, pues resulta con un tiempo medio de trabajo mayor que el CAP y menor que el BAP, pero con un poco más de desviación que el BAP y más balanceado que el CAP.

Como se puede observar, los métodos propuestos son mejor que la simulación del sistema actual, en relación al tiempo medio por operador y por tanto en tiempo total trabajado.

Para las siguientes instancias, las conclusiones son similares a las deducidas de la instancia r40801-1: r40801-2, r40801-3, que son aquellas donde se tienen a lo más 5 artículos de cada clase por lote; r40802-1, r40802-2, r40802-3, donde las proporciones varían entre 15 y 25 artículos de diferente clase por lote; r40803-1, r40803-2, r40803-3, donde se tienen dos artículos de cada clase por lote; r40806-1, r40806-2 y r40806-3 donde una clase de artículo representa entre el 75 % y 90 % de cada lote. Los resultados de estas instancias se incluyen en las tablas B.1 a B.12 en el apéndice B.

Se obtienen los mismos resultados utilizando cualquier método para las instancias r40804-1, r40804-2, r40804-3, donde en cada instancia todos los lotes están constituidos por el mismo artículo y para las instancias r40805-1, r40805-2 y

r40805-3, donde en cada instancia cada lote está constituido por un sólo artículo pero diferente en la clase. Los resultados de estas instancias se encuentran en la tabla B.13 del apéndice B.

6.2. CONCLUSIONES

Se hicieron diferentes planteamientos que abordan la problemática del sistema actual, empezando por la simulación del mismo, después se procedió a utilizar un modelo de asignación clásico CAP, en seguida para compensar el desbalance de carga de trabajo se procedió a utilizar un modelo de asignación con cuello de botella BAP y finalmente para compensar el tiempo de ejecución de este último proponemos un modelo de asignación con cotas. Tomar la mejor decisión respecto a la asignación de los trabajos a realizar, depende de la escala de valor que sea asignada por el tomador de decisiones en relación al tiempo total, al balanceo de la carga de trabajo y el tiempo de computo empleado para la obtención de información que dan el soporte a la toma de decisiones.

En el análisis del sistema actual se encuentra que existen mejores formas de distribución de trabajos a operadores, éstas logran realizar la misma cantidad de trabajo en menor tiempo y consideran sus habilidades y capacidades.

En una primera instancia se propone el modelo como un CAP con el cual se logra minimizar el tiempo esperado de trabajo total, pero ocurre un desequilibrio en cuanto a carga de trabajo de los operadores, ya que las diferencias entre tiempos trabajados por operador son muy notables.

Después se plantea el problema como un BAP, éste aumenta un poco el tiempo total trabajado, comparado con el CAP, pero sí logra un buen balanceo en carga de

trabajo, aunque el tiempo que requiere de ejecución para obtener la solución óptima del problema es muy grande, en unas instancias sobrepasa los 6000 segundos de tiempo computacional sin lograr aún la solución óptima.

Como el CAP resulta ser no balanceado y el BAP requiere demasiado tiempo para encontrar una solución óptima, se propone encontrar unas cotas para el tiempo trabajado por operador en cada lote, estas cotas se encuentran de las siguientes maneras; para las instancias donde las proporciones de una clase de artículo está entre 75% y 90% utilizamos las cotas obtenidas según sea el caso de S^m o S^M (al combinar un artículo de menor tiempo y uno de mayor tiempo, los tiempos mínimo y máximo encontrado por lote). Para los otros casos analizados, donde las proporciones de artículos son a lo más 5 de cada clase, o las proporciones son entre 15 y 25 de cada clase, o donde el lote se forma con 2 artículos de cada clase, se utiliza una tolerancia permitida $\tau/2$ sobre \bar{t} obtenido de la distribución hipergeométrica multivariada, dejando un rango de actuación de $[\bar{t} - \tau/2, \bar{t} + \tau/2]$

Cabe mencionar que en las instancias donde cada lote está compuesto por un sólo tipo de artículo, no importa el método por el que se resuelva la distribución de trabajos, pues el tiempo esperado de trabajo será el mismo por cualquier manera que se elija.

El tiempo computacional requerido para resolver el CAP y el problema de asignación con cotas es relativamente corto, menos de 0.5 segundos para cada instancia.

Al observar que el CAP tiene la propiedad de integrabilidad (matriz de restricciones unimodular), las restricciones de que las variables de decisión sean binarias se pueden eliminar. Esto nos permite utilizar un solver gratuito, como lo es el `gnumeric`.

Si lo que se pretende es minimizar tiempos totales del trabajo de los operadores por la jornada diaria (17 lotes), el CAP es la mejor opción; si se desea minimizar tiempos pero así mismo balancear carga de trabajo entre operadores, se recomienda el BAP; si además en este último caso se requiere que los tiempos de computo para ejecución del modelo sea adecuado (tiempo lo suficientemente corto para realizar cambios de asignación entre lotes), se recomienda el problema de asignación con cotas.

Presentamos a continuación la tabla 6.2 con un resumen de las ventajas y desventajas de cada uno de los modelos que estudiamos.

Método	Ventajas	Desventajas
Problema de Asignación Clásica (CAP)	<ul style="list-style-type: none"> · La solución óptima se encuentra en tiempo inmediato. · El total de tiempo trabajado se reduce considerablemente comparado con el tiempo total del sistema actual · El software que se requiere es de uso libre. 	<ul style="list-style-type: none"> · La solución óptima no balancea la carga de trabajo en cuanto a tiempo total trabajado.
Problema de Asignación de Cuello de Botella (BAP)	<ul style="list-style-type: none"> · La solución encontrada si logra un balanceo en cuanto a tiempo trabajado por operador. 	<ul style="list-style-type: none"> · Se requiere el uso de un software comercial. · Se necesita demasiado tiempo para encontrar la solución óptima. · La solución encontrada implica que el tiempo total trabajado es mayor que en el CAP.
Problema de Asignación con Cotas	<ul style="list-style-type: none"> · Se logra un mejor balanceo que el CAP pero no mejor que el BAP. · El procedimiento para encontrar las cotas es fácil y rápido. · La solución óptima se encuentra en tiempo inmediato. 	<ul style="list-style-type: none"> · Se requiere el uso de un software comercial. · El tiempo total trabajado es menor que el BAP, pero mayor que el CAP. · Se necesita calcular las cotas para cada lote.

Tabla 6.2: Comparación de métodos

6.3. CONTRIBUCIÓN

En este proyecto del estudio de los diferentes modelos de asignación de trabajos en un ambiente multiproducto por lotes con operadores de habilidades y capacidades diferentes se logra proporcionar las siguientes contribuciones.

La realización de una simulación para el análisis del sistema actual, que asigna los trabajos conforme se va desocupando los operadores.

El estudio y la implementación computacional de tres modelos diferentes para distribuir los trabajos a los operadores que reducen el tiempo total trabajado al compararlo con el sistema de distribución de trabajos actual en la línea de ensamblaje.

El diseño de un modelo que adecúe los beneficios de un modelo de asignación clásico para el logro de un resultado balanceado al incluir cotas en los tiempos de asignación por operador.

El desarrollo de un procedimiento para la especificación de cotas para balancer la carga de trabajo, que es dependiente del tipo de instancia según la proporción de clases de artículos dentro de un lote: uno, por medio de una tolerancia permitida sobre el valor del tiempo medio obtenido de la distribución hipergeométrica multivariada y otra por medio de sumas de medias mínimas y máximas de la combinación de un artículo de menor tiempo medio y uno de mayor tiempo medio. Estas cotas se obtienen en un tiempo rápido y son de muy buena calidad.

6.4. TRABAJO FUTURO

Sería una buena aportación realizar el análisis de los diferentes planteamientos del problema con los datos reales o hacer una simulación para ver que tan parecidos son los resultados a los que se presentan en este estudio, ya que sólo se realizó el análisis con los tiempos medios de los operadores. Aún así, los resultados del tiempo total trabajado que encontramos siguen siendo en un gran porcentaje de las instancias, mejores que la manera actual de realizar la asignación.

En la literatura [9] se utiliza el término de calidad en los trabajos, siendo este término medido para cada operador según la calidad con la que se ensambla cada artículo. Se deja como trabajo futuro implementar nuestra metodología ahora introduciendo este valor de la calidad.

Es también conveniente hacer una nueva metodología que estudie el proceso en operación, es decir, los tiempos con los que se cuenta en este estudio, son tiempos medios esperados que utiliza cada operador ensamblando cada tipo de artículo; en un modelo real o en la implementación misma, los valores de estos tiempos pueden variar, por consiguiente puede traer como consecuencia la acumulación de trabajos.

En caso de que el operador utilice más tiempo del esperado, o de que termine antes del tiempo esperado, se tendría que tomar una decisión de que hacer con la acumulación de trabajos que aún no han sido procesados, ya sea realizar una reasignación o reacomodo de trabajos durante el turno actual o del siguiente turno.

Se podrían analizar en el modelo algunas problemáticas que pueden aparecer en la línea de ensamblaje, tales como el cambio de turno o la ausencia de algún operador al empezar el turno o antes de terminarlo.

Como ya existe un estudio anterior que utiliza sistemas de multiagentes, se deja

como trabajo futuro la complementación que pueda surgir entre estos; un caso sería el como realizar basado en agentes, la asignación ya dentro de la línea de ensamblaje.

También se deja como trabajo futuro la implementación de métodos heurísticos para la solución del problema, en el caso que se desee utilizar el BAP o el problema de asignación con cotas, ya que estos requieren de un software comercial para resolver el problema de asignación de tareas, mientras que el CAP puede resolverse con ayuda del solver de gnumeric, que es de libre acceso. Con la ayuda de los métodos heurísticos se puede prescindir del CPLEX, que es el software comercial que se utilizó en este trabajo de tesis.

También se podría analizar la implementación de nuestras propuestas, ya que se piensa que estas eliminan el efecto de regreso de trabajos no asignados y la circulación innecesaria de trabajos a lo largo de la banda transportadora, ya que con las asignación de trabajos utilizando cualquiera de nuestros métodos (CAP, BAP o asignación con cotas) se tiene definido, desde antes de que entre el lote, a que área de trabajo va a ir cada artículo, lo que ocasiona un mejor orden de la entrada de los trabajos.

APÉNDICE A

TABLAS DE DATOS

e0510-1	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	2	3	0	2	0	4	1	1	3	3	1	2	2	0	3	3	1
2	1	0	4	3	2	1	3	5	1	1	5	1	4	0	1	3	4
3	1	4	0	2	4	0	0	0	4	0	0	1	0	3	2	1	5
4	1	0	1	2	1	4	2	1	0	1	4	3	1	2	1	2	0
5	5	3	5	1	3	1	4	3	2	5	0	3	3	5	3	1	0

Tabla A.1: Proporciones e0510-1

e0510-2	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	0	1	4	4	1	1	4	2	0	2	0	2	1	0	4	5
2	4	4	2	2	1	3	1	0	1	5	3	3	2	5	2	2	3
3	3	1	3	4	0	2	2	3	0	2	1	2	1	0	5	0	0
4	2	4	3	0	5	0	5	0	3	1	1	2	2	1	2	2	1
5	0	1	1	0	0	4	1	3	4	2	3	3	3	3	1	2	1

Tabla A.2: Proporciones e0510-2

e0510-3	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	2	1	3	2	1	1	2	2	3	2	0	2	3	1	3	3
2	2	1	2	2	2	3	3	2	1	2	3	3	2	2	2	2	3
3	3	2	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	0
4	2	2	3	1	2	1	2	1	3	2	1	2	2	0	3	2	2
5	2	3	1	1	2	3	2	3	2	2	3	3	3	3	2	2	2

Tabla A.3: Proporciones e0510-3

e0510-4	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	2	3	3	3	2	2	3	2	2	1	2	3	3	3	2	3	2
2	1	1	1	2	2	0	1	3	3	3	3	1	2	3	1	3	3
3	2	1	1	2	1	2	1	2	3	2	2	2	1	2	2	1	1
4	2	2	2	2	3	3	2	1	1	3	2	3	1	1	3	1	3
5	3	3	3	1	2	3	3	2	1	1	1	1	3	1	2	2	1

Tabla A.4: Proporciones e0510-4

e0510-5	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	2	1	3	2	1	1	2	2	3	2	0	2	3	1	3	3
2	2	1	2	2	2	3	3	2	1	2	3	3	2	2	2	2	3
3	3	2	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	0
4	2	2	3	1	2	1	2	1	3	2	1	2	2	0	3	2	2
5	2	3	1	1	2	3	2	3	2	2	3	3	3	3	2	2	2

Tabla A.5: Proporciones e0510-5

e1010-1	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla A.6: Proporciones e1010-1 y e1010-2

e1010-3	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	1	1	1	1	1	0	2	0	0	0	1	0	1	2	0	0
2	1	0	0	3	1	1	1	1	0	1	0	2	0	2	1	0	2
3	2	1	2	1	1	0	2	3	2	0	2	0	1	0	0	2	1
4	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	3	1	3	3	1	1	1
5	3	1	3	0	1	0	0	1	3	0	0	2	1	0	1	0	2
6	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	2	1	0	1
7	0	1	0	1	0	1	0	2	0	2	0	0	0	0	3	1	1
8	3	3	0	2	2	2	2	0	0	1	0	3	3	2	0	2	2
9	1	1	3	0	2	1	1	0	2	2	3	0	0	0	1	3	0
10	0	0	0	2	1	3	2	1	1	3	2	1	2	0	0	1	0

Tabla A.7: Proporciones e1010-3

e1010-4	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	3	4
2	2	0	0	0	2	0	0	0	2	2	1	0	1	0	0	3	0
3	3	3	0	0	2	6	0	0	1	1	0	0	1	6	1	0	0
4	0	0	4	0	6	0	0	1	0	0	0	5	2	0	1	0	3
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	1	0	5	1	0
6	0	0	1	0	0	4	0	1	0	0	1	0	4	2	0	0	0
7	1	3	5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	4	0	0	5	4	6	4	1	5	0	0	0	1	3
9	0	0	0	4	0	0	3	2	0	1	0	0	1	0	3	2	0
10	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0

Tabla A.8: Proporciones e1010-4

e1010-5	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	3	4
2	2	0	0	0	2	0	0	0	2	2	1	0	1	0	0	3	0
3	3	3	0	0	2	6	0	0	1	1	0	0	1	6	1	0	0
4	0	0	4	0	6	0	0	1	0	0	0	5	2	0	1	0	3
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	1	0	5	1	0
6	0	0	1	0	0	4	0	1	0	0	1	0	4	2	0	0	0
7	1	3	5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	4	0	0	5	4	6	4	1	5	0	0	0	1	3
9	0	0	0	4	0	0	3	2	0	1	0	0	1	0	3	2	0
10	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0

Tabla A.9: Proporciones e1010-5

r40801-1 Clase	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4	5	3	1	0	4	4	0	5	3	3	3	1	5	1	1	1
2	5	2	2	5	0	0	1	4	0	2	4	0	1	0	4	5	1
3	1	1	2	1	4	0	0	4	0	4	3	5	2	2	2	3	0
4	5	2	3	0	2	5	5	1	2	3	3	3	0	2	4	1	2
5	1	5	1	3	2	1	0	4	1	3	4	5	4	4	1	2	3
6	5	0	4	2	4	2	4	2	2	0	1	0	1	0	1	2	0
7	4	2	4	4	0	1	4	0	5	2	4	4	4	3	2	2	3
8	0	3	2	4	4	0	1	0	4	0	5	0	0	4	0	3	5
9	2	2	2	1	2	1	5	5	2	1	1	0	0	4	2	2	1
10	0	0	2	1	0	0	4	1	1	5	4	1	2	3	4	1	4
11	4	3	1	3	5	4	4	4	3	4	2	3	5	4	0	5	0
12	1	1	3	1	0	0	2	2	1	1	4	0	5	3	3	3	2
13	0	3	2	1	5	2	3	2	1	1	4	0	1	4	1	1	0
14	4	4	0	2	4	3	2	3	5	0	2	5	3	2	2	1	4
15	2	5	0	1	0	4	0	3	1	4	1	4	2	3	4	1	1
16	0	3	3	3	3	5	1	4	4	5	0	1	0	1	4	3	3
17	1	3	2	0	3	3	3	5	0	5	0	3	0	0	1	2	5
18	2	2	5	5	1	0	0	1	4	3	4	1	3	2	0	2	5
19	1	4	5	2	3	3	3	3	0	0	1	1	5	4	2	0	2
20	3	1	4	5	1	3	1	2	5	1	2	3	1	1	3	2	0
21	2	2	4	1	3	5	5	1	4	1	2	1	5	1	3	5	2
22	2	1	3	0	4	0	2	4	0	0	2	2	4	0	0	2	0
23	0	1	2	0	0	4	0	1	2	1	3	0	2	1	0	0	0
24	1	0	2	4	2	0	0	4	3	2	2	5	1	2	0	0	2
25	2	3	1	2	0	0	4	1	0	3	2	0	0	1	4	5	4
26	2	2	1	2	4	4	1	1	1	2	0	3	4	0	5	3	3
27	0	1	0	1	1	0	1	0	2	4	2	2	5	0	4	1	0
28	3	0	2	5	2	3	1	2	2	2	0	2	4	1	3	1	5
29	3	3	3	4	0	3	2	2	0	5	0	1	1	2	1	2	0
30	2	2	2	5	2	4	0	3	2	3	2	1	0	0	1	0	2
31	0	4	0	2	1	2	0	2	2	2	2	1	0	5	1	4	1
32	1	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	3	4	4	1	5
33	0	3	0	0	2	0	0	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2
34	4	0	3	3	3	4	0	3	3	0	2	1	1	0	1	4	3
35	4	0	0	2	4	2	4	0	5	0	0	1	0	3	0	0	1
36	3	2	0	2	0	3	1	0	2	1	0	4	1	0	2	1	1
37	0	1	0	0	2	0	5	1	2	0	2	5	5	3	3	1	1
38	4	1	2	1	3	2	2	0	1	2	1	4	0	2	3	4	2
39	0	0	2	0	3	1	1	2	3	4	2	0	3	2	1	2	2
40	2	2	3	1	0	2	2	1	0	0	2	4	0	0	3	1	2

Tabla A.10: Proporciones r40801-1

r40801-2 Clase	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	4	2	2	4	1	3	5	5	1	4	1	2	1	5	1	3	5
2	5	2	1	3	0	4	0	2	4	0	0	2	2	4	0	0	2
3	3	0	1	2	0	0	4	0	1	2	1	3	0	2	1	0	0
4	3	1	0	2	4	2	0	0	4	3	2	2	5	1	2	0	0
5	1	2	3	1	2	0	0	4	1	0	3	2	0	0	1	4	5
6	1	2	2	1	2	4	4	1	1	1	2	0	3	4	0	5	3
7	2	0	1	0	1	1	0	1	0	2	4	2	2	5	0	4	1
8	4	3	0	2	5	2	3	1	2	2	2	0	2	4	1	3	1
9	2	3	3	3	4	0	3	2	2	0	5	0	1	1	2	1	2
10	5	2	2	2	5	2	4	0	3	2	3	2	1	0	0	1	0
11	0	0	4	0	2	1	2	0	2	2	2	2	1	0	5	1	4
12	1	1	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	3	4	4	1
13	1	0	3	0	0	2	0	0	2	0	1	2	0	1	2	0	1
14	4	4	0	3	3	3	4	0	3	3	0	2	1	1	0	1	4
15	0	4	0	0	2	4	2	4	0	5	0	0	1	0	3	0	0
16	3	3	2	0	2	0	3	1	0	2	1	0	4	1	0	2	1
17	2	0	1	0	0	2	0	5	1	2	0	2	5	5	3	3	1
18	1	4	1	2	1	3	2	2	0	1	2	1	4	0	2	3	4
19	2	0	0	2	0	3	1	1	2	3	4	2	0	3	2	1	2
20	3	2	2	3	1	0	2	2	1	0	0	2	4	0	0	3	1
21	0	4	5	3	1	0	4	4	0	5	3	3	3	1	5	1	1
22	1	5	2	2	5	0	0	1	4	0	2	4	0	1	0	4	5
23	3	1	1	2	1	4	0	0	4	0	4	3	5	2	2	2	3
24	2	5	2	3	0	2	5	5	1	2	3	3	3	0	2	4	1
25	5	1	5	1	3	2	1	0	4	1	3	4	5	4	4	1	2
26	3	5	0	4	2	4	2	4	2	2	0	1	0	1	0	1	2
27	2	4	2	4	4	0	1	4	0	5	2	4	4	4	3	2	2
28	1	0	3	2	4	4	0	1	0	4	0	5	0	0	4	0	3
29	1	2	2	2	1	2	1	5	5	2	1	1	0	0	4	2	2
30	2	0	0	2	1	0	0	4	1	1	5	4	1	2	3	4	1
31	1	4	3	1	3	5	4	4	4	3	4	2	3	5	4	0	5
32	0	1	1	3	1	0	0	2	2	1	1	4	0	5	3	3	3
33	0	0	3	2	1	5	2	3	2	1	1	4	0	1	4	1	1
34	2	4	4	0	2	4	3	2	3	5	0	2	5	3	2	2	1
35	3	2	5	0	1	0	4	0	3	1	4	1	4	2	3	4	1
36	2	0	3	3	3	3	5	1	4	4	5	0	1	0	1	4	3
37	3	1	3	2	0	3	3	3	5	0	5	0	3	0	0	1	2
38	2	2	2	5	5	1	0	0	1	4	3	4	1	3	2	0	2
39	0	1	4	5	2	3	3	3	3	0	0	1	1	5	4	2	0
40	0	3	1	4	5	1	3	1	2	5	1	2	3	1	1	3	2

Tabla A.11: Proporciones r40801-2

r40801-3 Clase	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	2	0	0	3	1	1	3	0	0	1	1	5	0	5	5	0	0
2	0	1	2	3	1	0	0	2	2	4	5	2	1	3	1	2	5
3	0	3	0	2	1	0	1	1	4	4	3	4	4	3	0	0	3
4	2	2	2	4	5	5	0	4	4	3	2	0	4	3	4	4	2
5	4	5	0	4	2	4	4	2	4	1	3	5	1	3	0	4	3
6	3	3	1	1	4	1	2	5	4	1	5	1	0	5	2	1	2
7	0	2	1	0	3	1	1	2	0	5	4	4	0	0	1	0	0
8	5	1	0	1	1	4	2	3	0	1	2	1	4	3	2	4	3
9	0	1	3	2	0	4	3	4	4	1	2	0	3	1	3	2	0
10	2	2	5	1	1	0	1	5	3	4	2	0	2	0	2	3	0
11	1	1	5	3	2	5	1	0	4	1	2	3	4	0	2	4	1
12	5	0	3	3	5	5	3	0	1	0	0	4	4	5	3	4	1
13	2	0	1	2	2	2	2	2	0	2	1	1	2	2	0	3	5
14	3	2	3	0	5	2	0	1	2	4	3	4	5	4	4	4	2
15	1	3	1	2	0	0	0	3	1	0	2	3	4	2	5	3	5
16	1	2	3	2	1	0	2	1	1	2	0	2	4	1	0	2	2
17	1	3	1	4	0	1	1	3	3	2	3	4	2	4	2	2	3
18	2	2	4	0	3	1	3	4	4	1	0	4	1	3	2	0	2
19	2	0	3	4	2	2	1	0	2	3	3	0	2	0	5	3	2
20	2	0	0	0	1	2	3	3	2	3	2	2	1	0	1	1	1
21	1	4	4	5	1	3	4	0	0	0	1	4	1	0	4	2	1
22	1	5	3	2	1	3	2	4	3	1	5	0	2	1	0	1	0
23	0	3	5	3	0	2	1	0	4	1	3	2	3	0	1	0	3
24	2	3	3	4	2	2	3	1	3	5	0	1	2	3	2	4	0
25	3	1	1	1	4	1	2	3	0	4	0	1	2	3	4	1	3
26	0	1	1	2	5	1	3	1	0	4	1	0	1	5	2	3	3
27	3	2	2	2	4	0	4	1	4	0	3	0	1	3	4	3	1
28	5	4	2	0	0	1	3	0	0	0	3	4	0	1	2	4	4
29	1	2	1	2	0	4	1	2	4	0	0	1	1	0	1	1	5
30	4	5	2	3	1	4	4	2	0	3	4	2	0	2	2	0	0
31	0	0	0	1	2	3	5	0	0	3	0	1	4	1	2	4	0
32	2	1	1	1	0	2	3	3	1	5	0	0	0	1	0	1	2
33	0	1	2	1	3	4	3	1	1	1	1	4	2	3	1	1	5
34	4	4	1	2	0	1	2	4	2	2	3	4	3	1	0	1	1
35	1	0	3	4	3	3	0	1	5	0	1	0	2	1	1	0	1
36	3	3	2	1	4	0	1	2	1	2	3	0	0	2	5	4	2
37	5	2	4	1	1	2	2	1	1	2	1	2	3	0	2	3	3
38	5	1	3	1	4	0	2	4	2	0	2	3	2	1	1	0	0
39	2	2	1	1	2	2	0	4	4	0	0	2	1	4	0	1	1
40	0	3	1	2	3	2	2	1	0	4	4	0	2	1	2	0	3

Tabla A.12: Proporciones r40801-3

r40802-1	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0
2	0	20	0	20	0	0	24	0	0	0	0	20	0	0	0	24	0
3	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0
4	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0
6	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	15	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
15	21	0	0	0	18	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0
20	0	24	0	0	18	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	15	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	24	0	0	20	0
24	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	22	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	19	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	24	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	21	0	0	23	0	0	20
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	19	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	18	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0
38	0	0	22	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	25
39	0	0	17	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.13: Proporciones r40802-1

r40802-2	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	17	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	18	0	0
9	0	0	0	22	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0
11	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
13	0	0	0	17	0	0	0	0	23	0	0	0	19	0	0	0	18
14	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
15	0	24	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	17	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	19	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	23	15	25
22	23	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	17	0	22	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	24	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	16	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	20	0	0
30	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	19	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	19	0	0	0	0	19
32	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	22	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0
35	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	18
36	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	18	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	24	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.14: Proporciones r40802-2

r40802-3	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0
3	0	0	0	0	0	18	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	19	0	0	0	19	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0
7	0	20	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0
9	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0
10	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
11	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0
12	0	24	0	24	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	19	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	16	0
14	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	23	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0
16	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	22
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	11	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0
21	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0
22	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0
25	20	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0
26	18	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
29	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0
30	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	15
33	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	24	0	20	0	0	0	0	0	25	0	0	0
35	0	0	0	0	0	19	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	19	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.15: Proporciones r40802-3

r40803	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
15	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
19	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
20	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
22	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
23	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
24	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
25	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
26	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
27	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
28	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
29	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
30	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
31	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
32	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
33	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
34	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
35	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
36	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
37	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
38	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
39	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabla A.16: Proporciones r40803-1, r40803-2 y r40803-3

r40804-1	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.17: Proporciones r40804-1

r40804-2	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.18: Proporciones r40804-2

r40804-3	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.19: Proporciones r40804-3

r40805-1	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.20: Proporciones r40805-1

r40805-2	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.21: Proporciones r40805-2

r40805-3	Lote																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.22: Proporciones r40805-3

r40806	Lote																
Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	0	0	0	0	0
2	0	64	0	64	0	0	73	0	0	0	0	3	0	0	0	72	0
3	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0
4	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0
6	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	3	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71
15	2	0	0	0	3	0	0	0	0	72	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
20	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	4	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0	3	0
24	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	10	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	4	0	0	3	0	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
29	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	7	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	70	0	0	3
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	2	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	3	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
38	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
39	0	0	5	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.23: Proporciones r40806-1, r40806-2 y r40806-3

Clase	Media (unidades de tiempo)
1	12.0
2	8.3
3	14.8
4	18.7
5	18.5
6	19.5
7	7.2
8	12.3
9	18.2
10	8.8
11	10.2
12	7.6
13	7.4
14	9.1
15	9.9
16	7.2
17	10.7
18	11.5
19	14.2
20	11.6
21	11.8
22	11.6
23	18.8
24	13.1
25	12.5
26	11.0
27	19.7
28	17.5
29	19.9
30	10.3
31	19.4
32	7.7
33	16.2
34	17.6
35	19.6
36	13.1
37	10.9
38	16.8
39	11.6
40	17.1

Tabla A.24: Medias de artículos por clase

APÉNDICE B

RESULTADOS

r40801-1 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	442.1	24.8	-
CAP	412.3	76.4	3.42
BAP	424.9	10.3	5021.31
BoAP	415.0	19.6	4.25

Tabla B.1: Resultados de r40801-1

r40801-2 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	467.8	20.8	-
CAP	438.0	83.1	3.56
BAP	445.6	7.8	2791.63
BoAP	441.0	17.7	3.94

Tabla B.2: Resultados de r40801-2

r40801-3 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	455.3	21.2	-
CAP	425.3	81.3	2.97
BAP	434.7	9.2	1865.99
BoAP	428.1	16.8	3.45

Tabla B.3: Resultados de r40801-3

r40802-1 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	472.5	17.1	-
CAP	453.1	41.1	3.26
BAP	463.3	9.4	6316.83
BoAP	459.7	12.5	4.12

Tabla B.4: Resultados de r40802-1

r40802-2 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	478.5	16.3	-
CAP	457.7	39.9	3.54
BAP	468.1	12.7	5928.95
BoAP	464.7	15.4	3.96

Tabla B.5: Resultados de r40802-2

r40802-3 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	450.1	17.9	-
CAP	430.1	29.6	3.42
BAP	440.7	10.3	4862.15
BoAP	436.5	15.4	4.2

Tabla B.6: Resultados de r40802-3

r40803-1 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	453.3	26.4	-
CAP	421.9	136.4	3.65
BAP	425.1	37.5	1896.35
BoAP	425.1	37.5	4.53

Tabla B.7: Resultados de r40803-1

r40803-2 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	453.7	19.9	-
CAP	421.9	141.1	3.5
BAP	424.5	42.2	713.32
BoAP	424.5	42.2	3.97

Tabla B.8: Resultados de r40803-2

r40803-3 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	454.1	25.3	-
CAP	421.9	134.5	2.98
BAP	427.0	41.6	338.13
BoAP	424.4	38.5	3.54

Tabla B.9: Resultados de r40803-3

r40806-1 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	446.4	18.1	-
CAP	438.4	22.1	3.81
BAP	442.9	13.7	1025.49
BoAP	439.4	14.1	4.9

Tabla B.10: Resultados de r40806-1

r40806-2 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	445.0	17.7	-
CAP	438.0	20.7	3.97
BAP	442.9	11.1	1018.12
BoAP	438.6	13.7	4.62

Tabla B.11: Resultados de r40806-2

r40806-3 Método	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
Simulación	444.1	17.2	-
CAP	436.7	19.9	3.82
BAP	442.1	12.6	1028.52
BoAP	437.5	15.7	4.53

Tabla B.12: Resultados de r40806-3

Instancia	Media por operador	Desviación estándar	Tiempo total de cómputo
r40804-1	410.0	19.4	3.5
r40804-2	285.3	18.7	3.6
r40804-3	661.0	21.8	2.93
r40805-1	401.0	4.4	3.4
r40805-2	489.2	4.8	3.41
r40805-3	448.9	4.3	3.54

Tabla B.13: Resultados de las instancias de una sola clase por lote

APÉNDICE C

GRÁFICAS

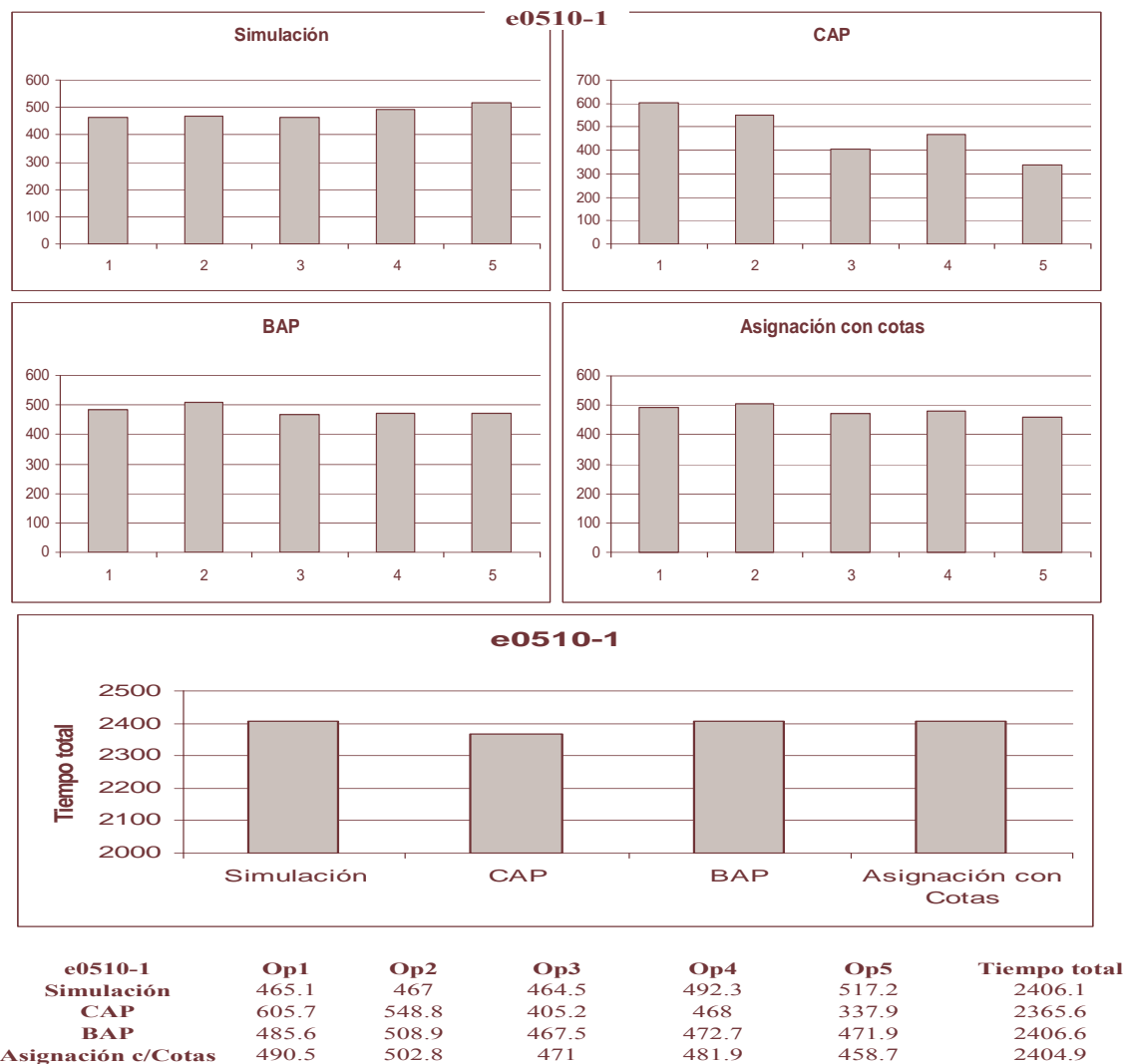
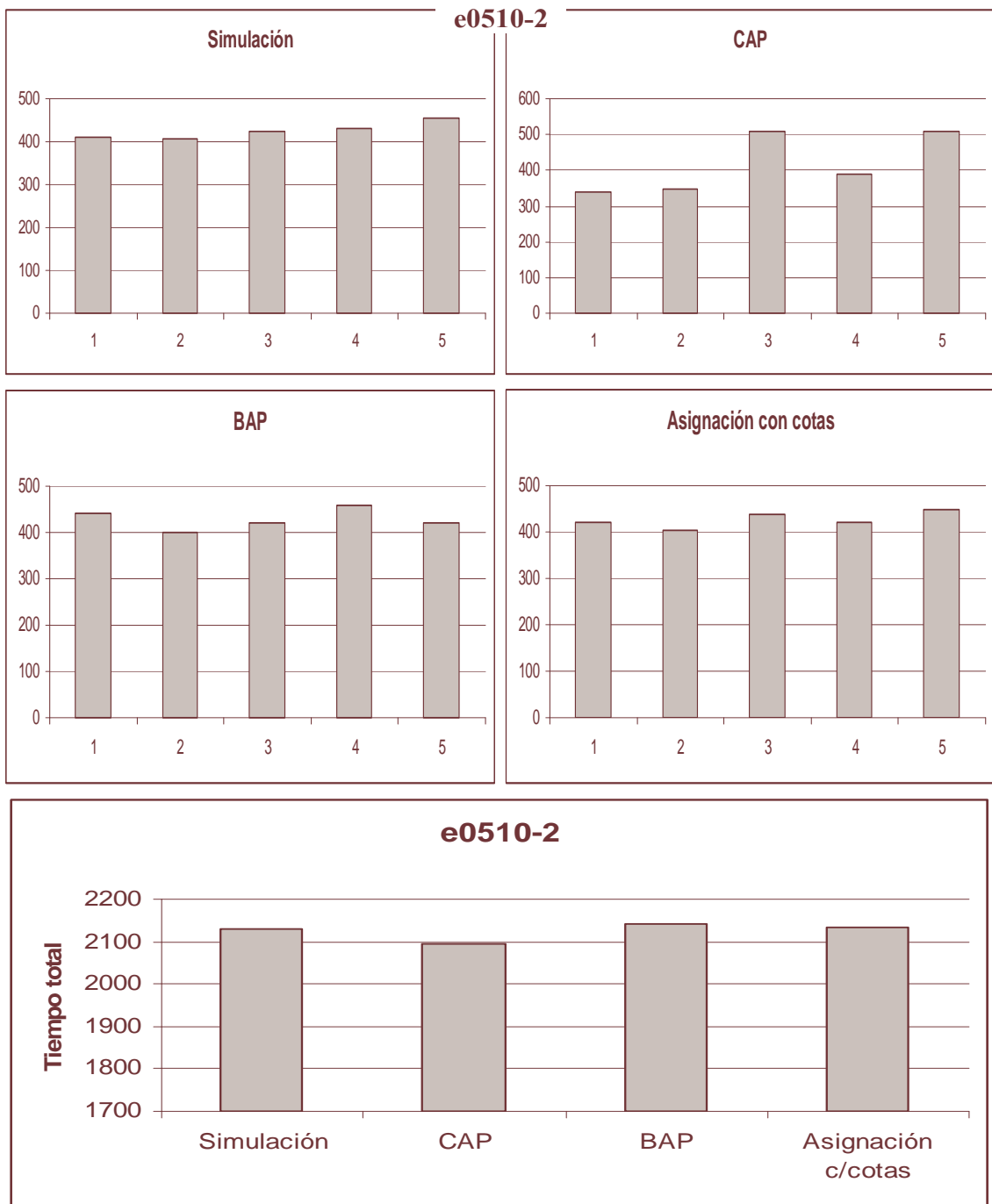
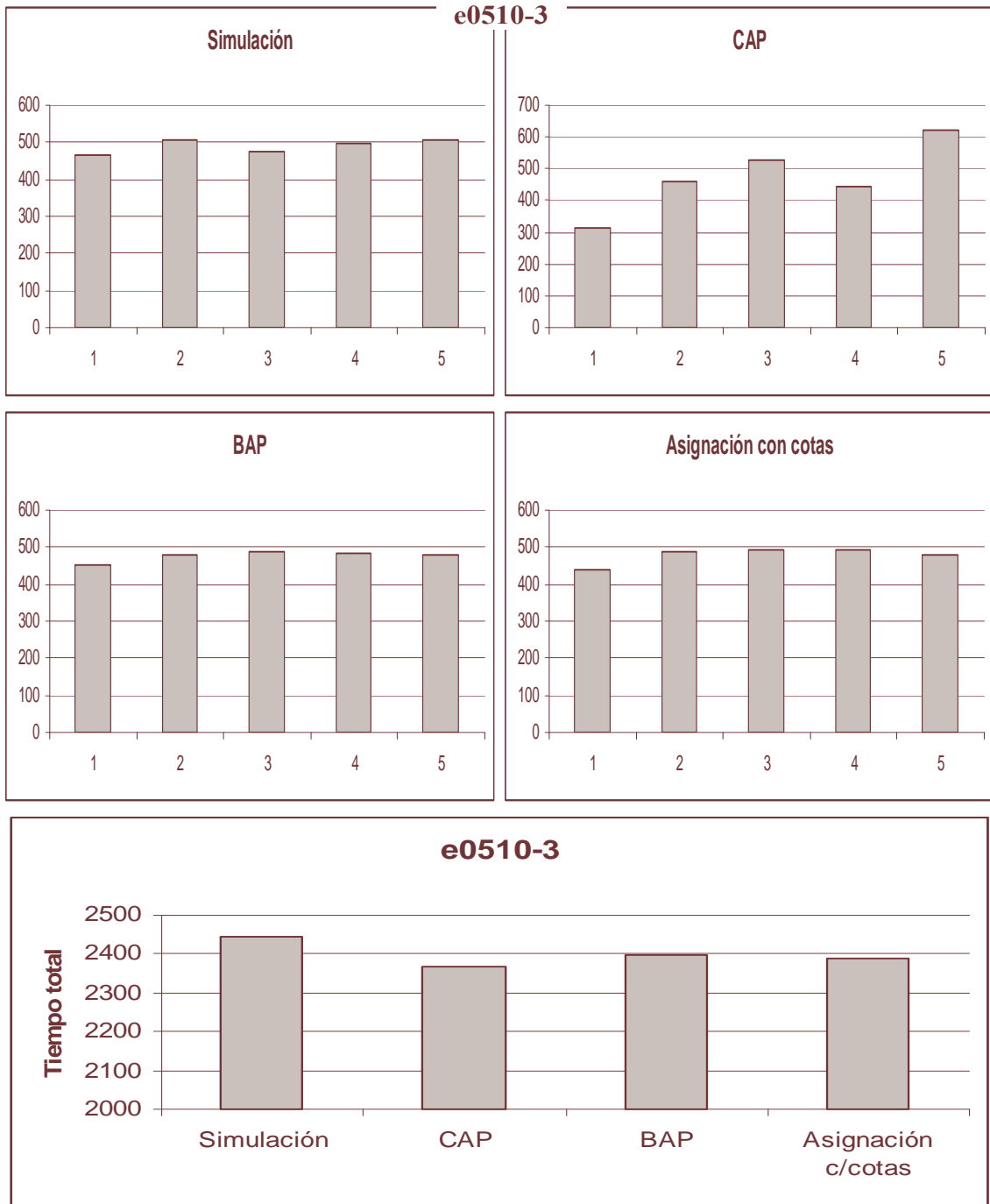


Figura C.1: e0510-1



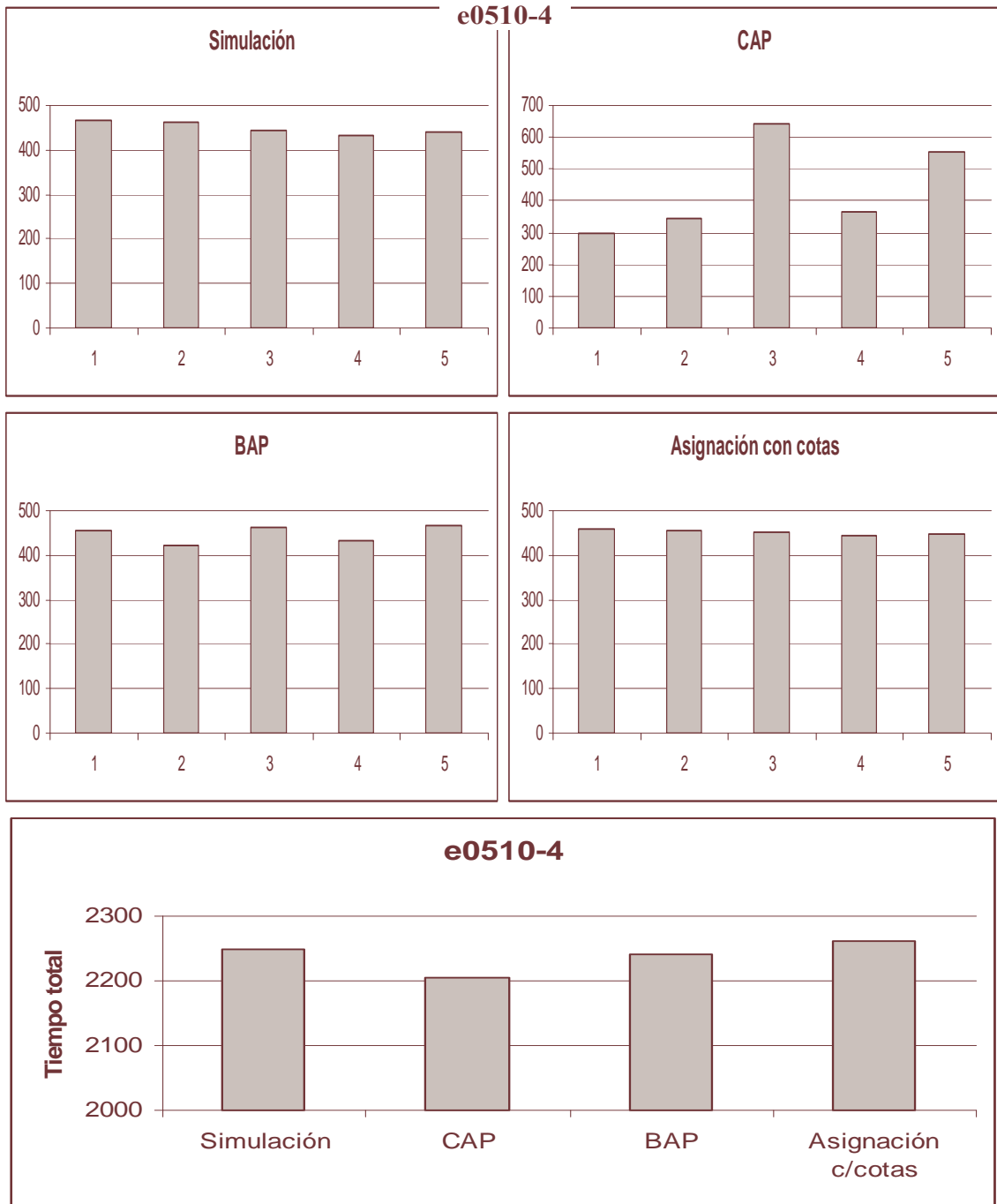
e0510-2	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	411.3	407.6	423.8	430.1	456.1	2128.9
CAP	338.6	346.1	510.6	390.5	509	2094.8
BAP	441.3	399.8	419.9	459.9	421.4	2142.3
Asignación c/Cotas	422.4	402.4	438.8	422.3	447.8	2133.7

Figura C.2: e0510-2



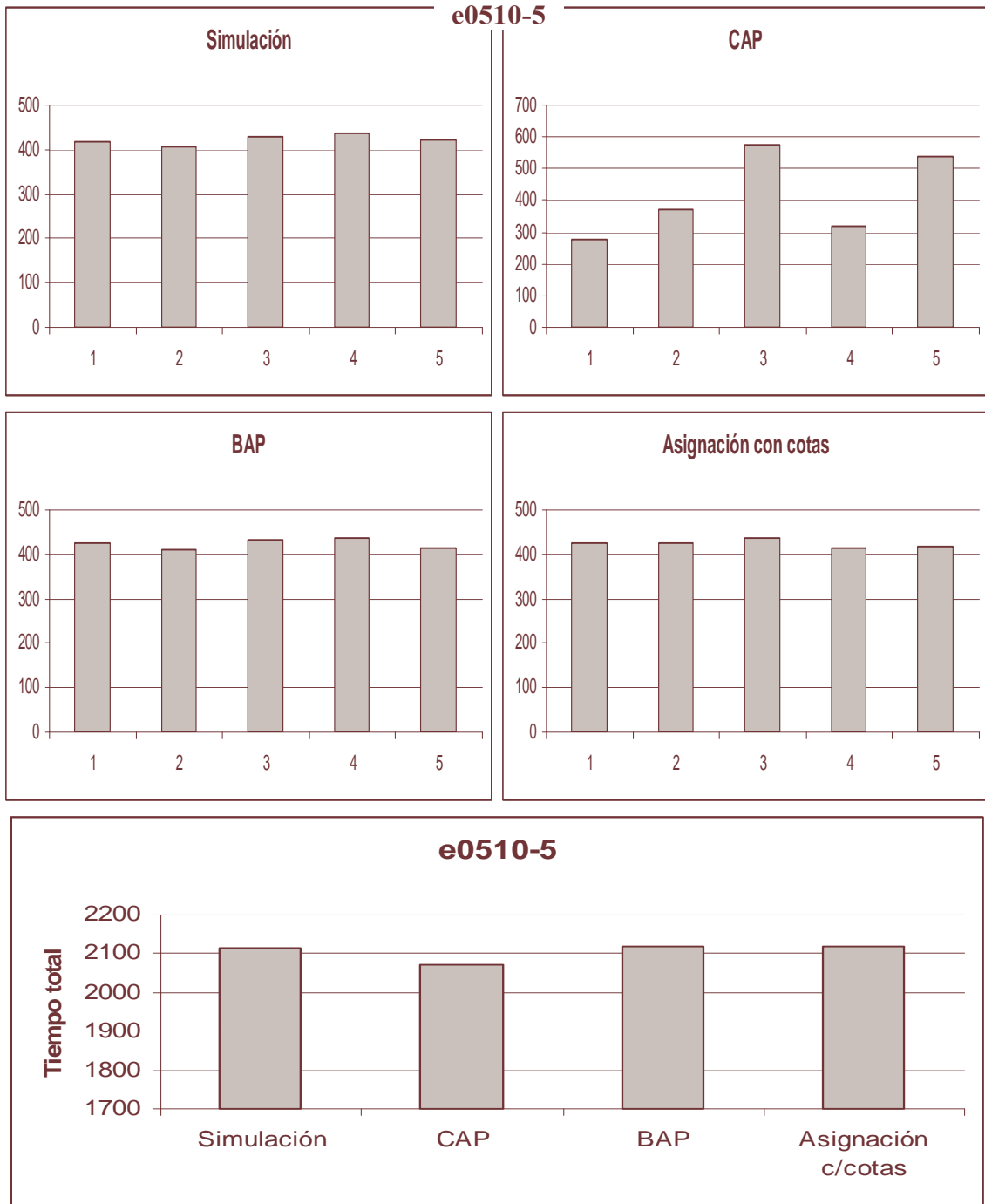
e0510-3	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	464.4	507.4	472.4	494.8	506.1	2445.1
CAP	313.4	461.6	529.7	442.2	619.4	2366.3
BAP	453.1	480.6	487.4	484.8	480.9	2386.8
Asignación c/cotas	440	488.1	493.7	493	480.6	2395.4

Figura C.3: e0510-3



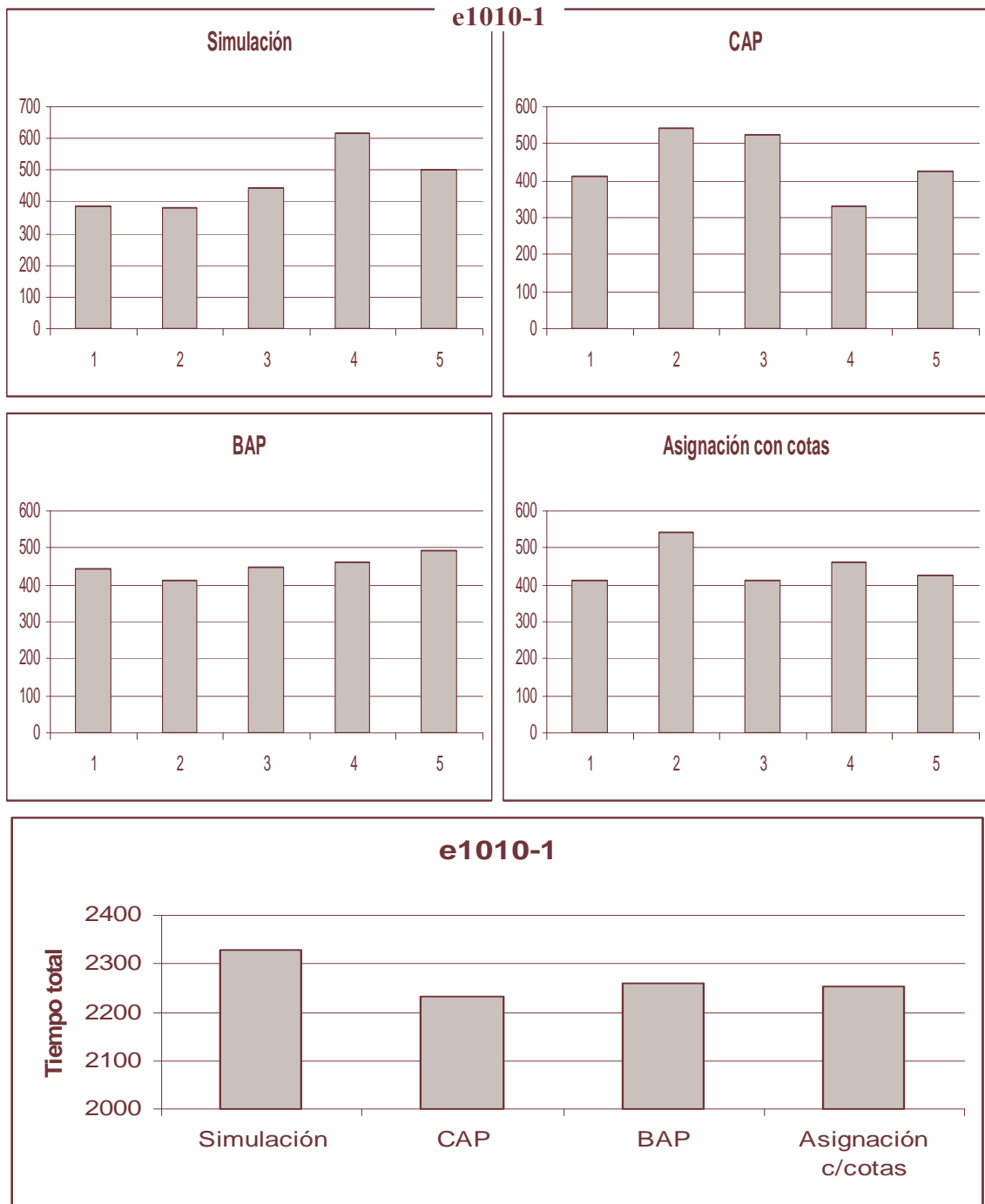
e0510-4	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	466.5	463.8	442.8	433.8	441.9	2248.8
CAP	299.3	342.9	644.1	365.5	552.3	2204.1
BAP	456	422.6	461.9	433.1	467.4	2241
Asignación c/cotas	460.6	456.6	452.7	443.4	448.5	2261.8

Figura C.4: e0510-4



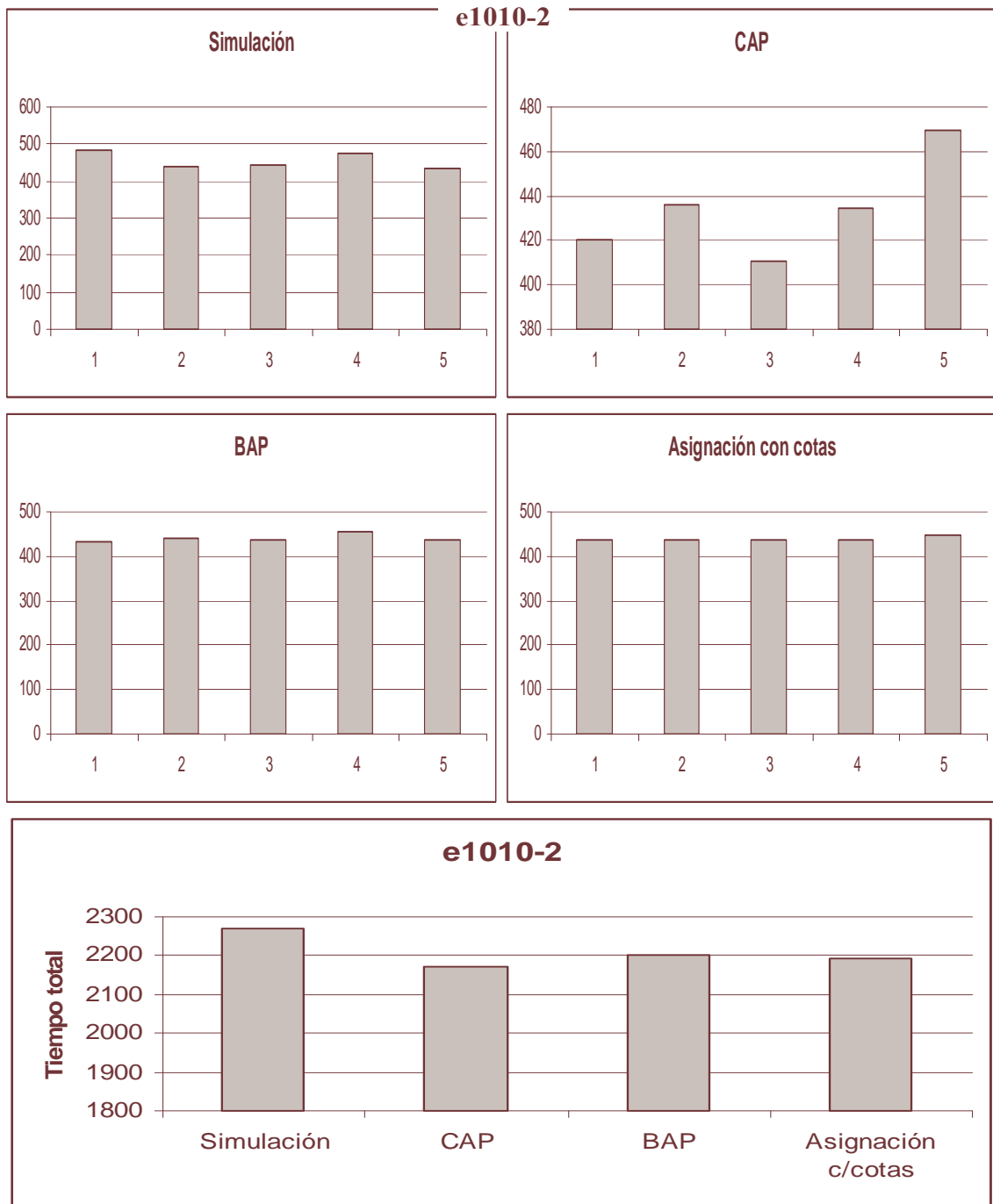
e0510-5	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	418.5	407.5	430.8	437.8	419.8	2114.4
CAP	276.1	369.4	573.4	317.3	535.5	2071.7
BAP	425	408.6	434	434.8	416	2118.4
Asignación c/cotas	423.8	425.9	435	414	418.4	2117.1

Figura C.5: e0510-5



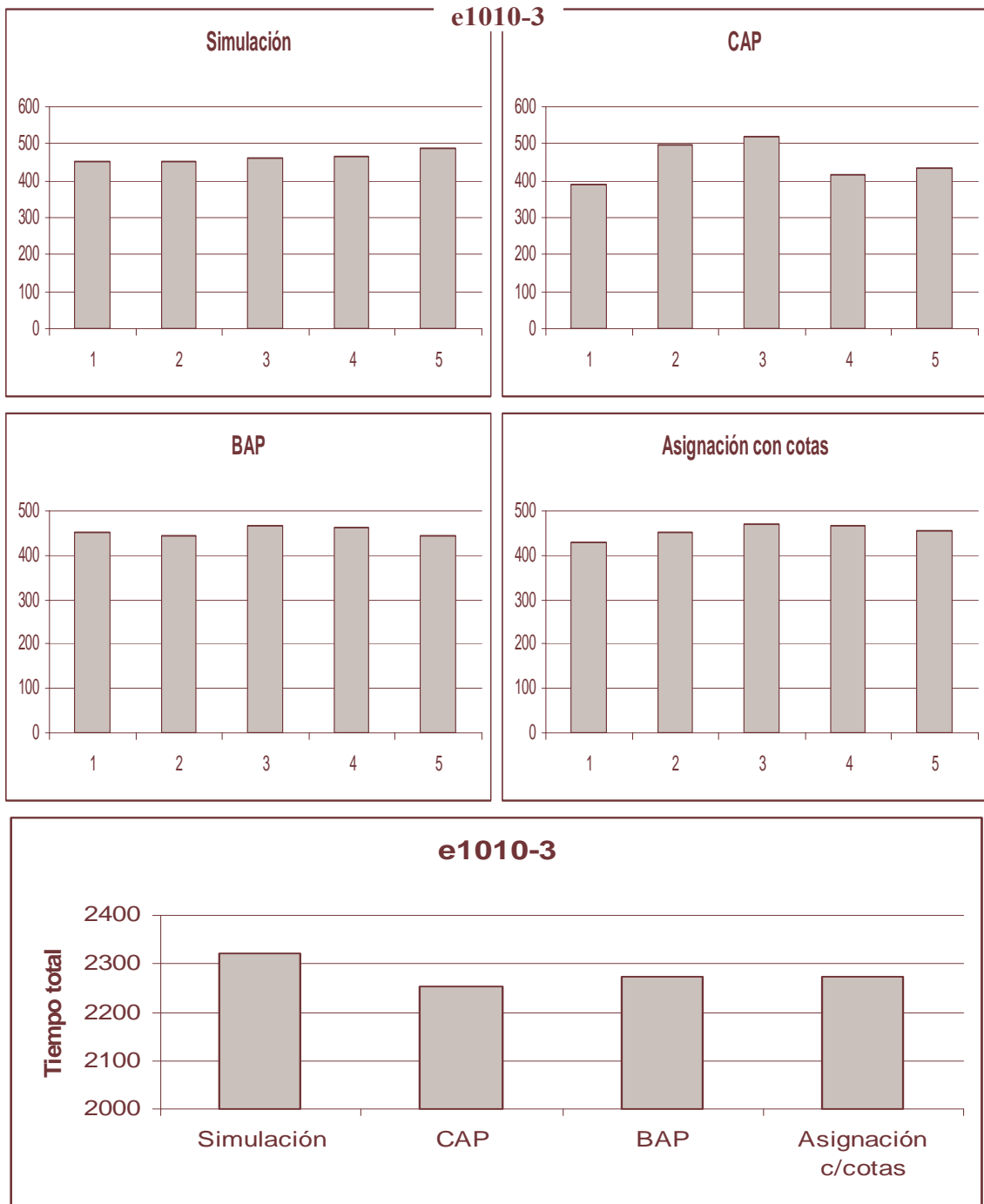
e1010-1	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	388.7	381.1	442	617.1	499.5	2328.4
CAP	413.1	544	521.9	329.8	423.3	2232.1
BAP	445.4	413.1	447.1	462.4	491.3	2259.3
Asignación c/cotas	413.1	544	411.4	460.7	423.3	2252.5

Figura C.6: e1010-1



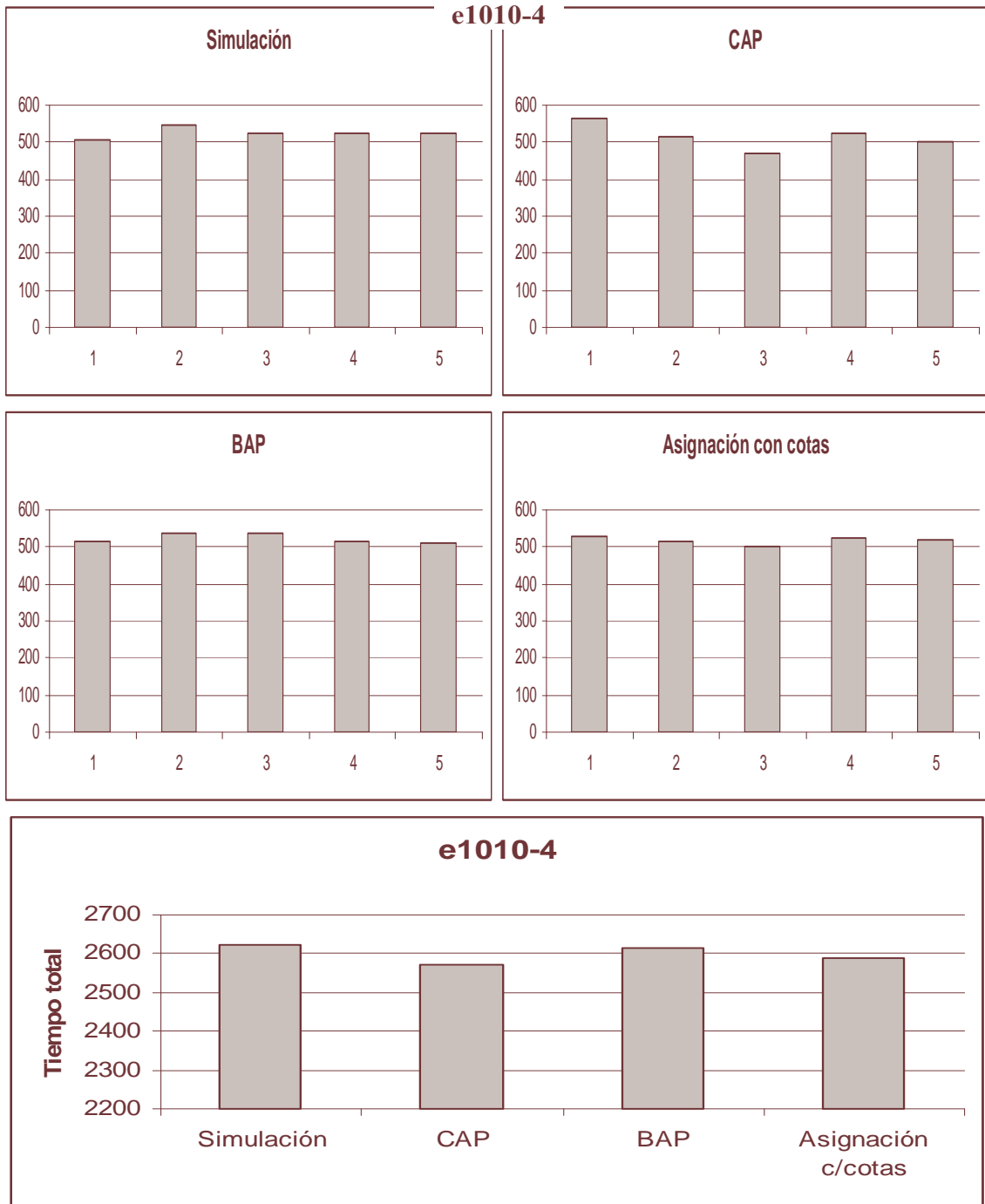
e1010-2	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	485.6	436.8	442.4	472.6	434.6	2272
CAP	420.5	435.9	410.5	434.7	469.6	2171.2
BAP	434	441.2	438.3	453.7	436.3	2203.5
Asignación c/cotas	435.7	434.9	437.1	437.7	447.8	2193.2

Figura C.7: e1010-2



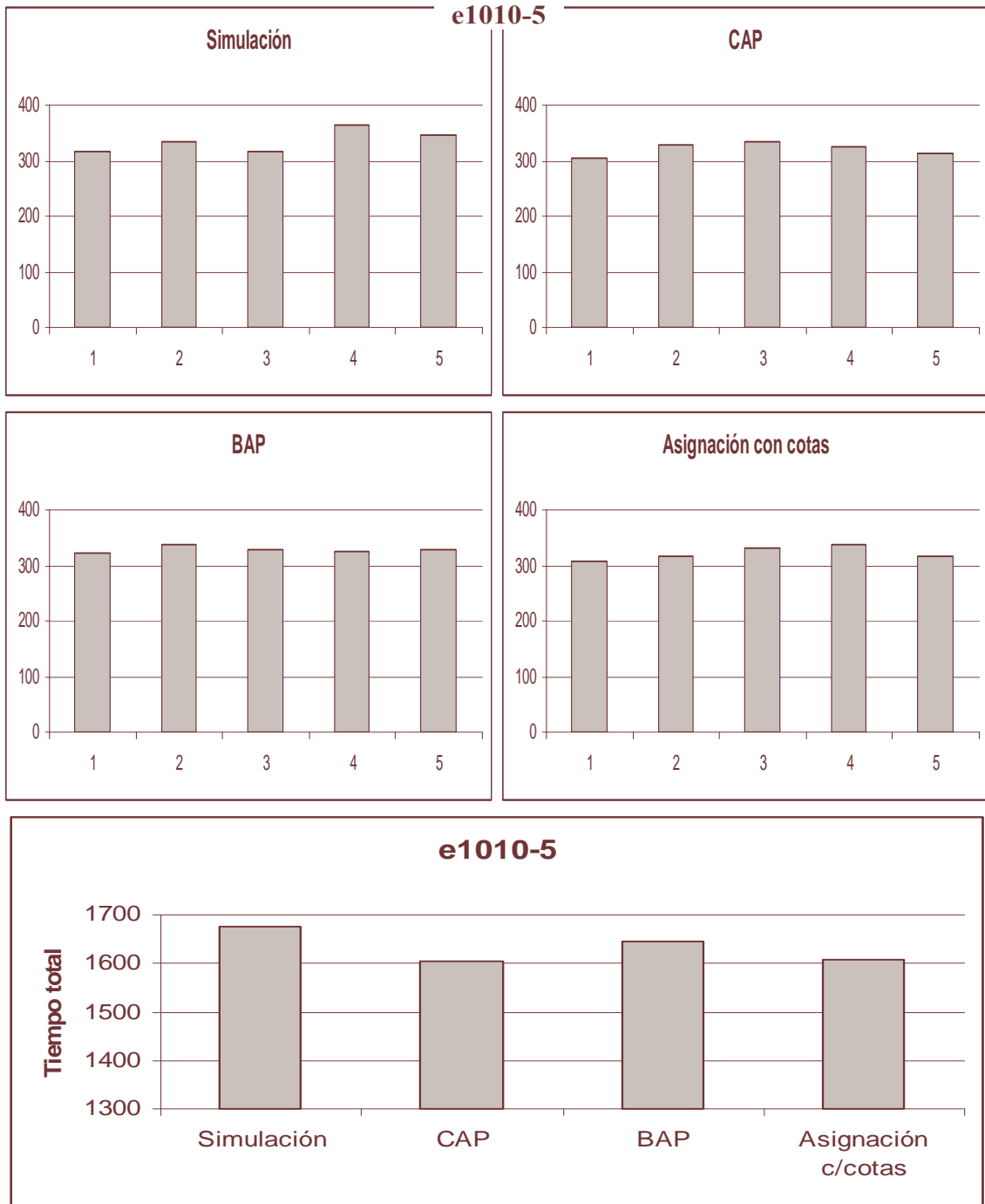
e1010-3	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	453.9	451	462.9	463.9	488.3	2320
CAP	388.3	497.9	519.3	414.2	432.5	2252.2
BAP	451.6	444.9	467.8	463.2	445.3	2272.8
Asignación c/cotas	430.7	451.5	470.8	466.5	454.6	2274.1

Figura C.8: e1010-3



e1010-4	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	505.6	547.8	524.5	525.1	521.9	2624.9
CAP	563	514.4	469.3	523.3	500.4	2570.4
BAP	512.7	535.1	536.5	517.1	511.5	2612.9
Asignación c/cotas	528.5	516.3	501.1	523.6	520.6	2590.1

Figura C.9: e1010-4



e1010-5	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Tiempo total
Simulación	317.2	333.9	317.2	363.4	345.2	1676.9
CAP	305.4	328.6	333.8	324.2	312.3	1604.3
BAP	323	338.4	328.9	325.6	329.1	1645
Asignación c/cotas	307.1	316	330.4	337.3	315.8	1606.6

Figura C.10: e1010-5

r40801-1	BAP	Simulación	CAP	Asignación c/Cotas
Op1	456.9	242.3	440.4	422.9
Op2	425.5	419.7	422.8	420.1
Op3	416.4	427.4	420.9	392.6
Op4	436.3	353.2	434.8	431.6
Op5	415.9	495.8	440.5	448.8
Op6	402.6	337.6	423.2	412.3
Op7	416.4	489.9	420.4	448.4
Op8	428.6	385.1	410.5	410.2
Op9	445.3	475.4	429	411.2
Op10	462.4	485.4	433.9	404.1
Op11	435.3	316.5	421.2	378.9
Op12	441	370.3	426.6	397.2
Op13	437.1	379.7	437	420.3
Op14	417.9	526.7	428.8	405.1
Op15	424.9	431.6	445.5	431.3
Op16	404.2	475.9	412.8	426.6
Op17	470.9	461.2	442.5	443
Op18	480.2	394.4	437.6	383.3
Op19	467.4	581	424.8	435.2
Op20	455.5	338.8	425.6	413.3
Op21	426.1	313	403.7	387.9
Op22	434.1	360.7	440.1	441.2
Op23	480.5	374.4	412.8	382.7
Op24	480.4	426.3	412	456.1
Op25	493.6	455.9	423.2	425.6
Op26	457.4	256.3	429.2	411.1
Op27	453.3	367.5	420	379.8
Op28	459.3	494.8	412.4	418.3
Op29	461.1	498.2	414.8	411.7
Op30	396	410.8	421.2	405.6
Op31	454.2	398.5	420.3	415.8
Op32	438.4	361.8	420.6	409
Op33	476.1	423	422.1	393.3
Op34	410	379.1	434.7	404
Op35	458.9	371.7	425.1	416.9
Op36	427.8	296.8	416.1	417.6
Op37	414.1	449.5	426.6	414.3
Op38	423	507.4	404.3	430.5
Op39	432.6	428.9	430.5	402
Op40	466.6	529.9	428.2	439.4
Tiempo total	17684.2	16492	16996.7	16599.2

Tabla C.1: Resultados r40801-1

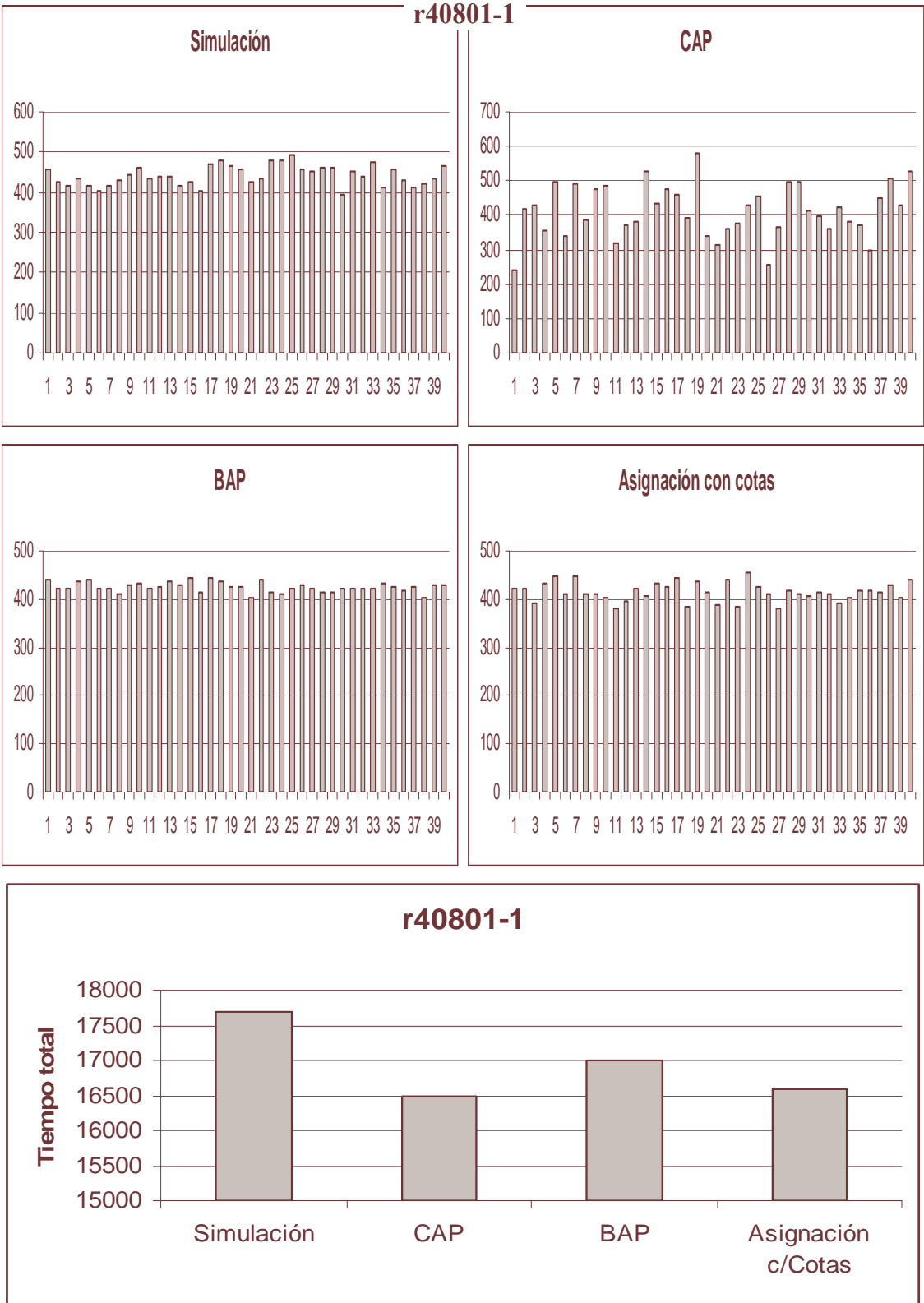


Figura C.11: r40801-1

r40801-2	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	445.4	295.4	441.3	443.6
Op2	443.3	433.9	448	415.4
Op3	449.9	455.8	446.1	423.5
Op4	426.7	334.3	445	450.9
Op5	444.8	547.9	455.4	450.3
Op6	494.7	339.6	442.4	419.9
Op7	493.1	471	425.8	450.8
Op8	466.7	468.4	447.6	441.1
Op9	440.9	448.8	433.6	461.1
Op10	479.5	519.6	458.4	429.8
Op11	445.4	320.4	448.7	412.1
Op12	467.4	380.6	438.7	439
Op13	476.9	374.2	452.1	444.6
Op14	453	505.3	442.9	451.1
Op15	490.8	521.4	435.6	455.1
Op16	470.8	538	450.3	455.9
Op17	489.7	560.7	443.3	446.3
Op18	466.9	405	451.6	422.2
Op19	460	573.9	458	442.2
Op20	474.7	348.8	449.7	437.6
Op21	474.8	322.9	445	416.6
Op22	462	406.1	453.1	454.3
Op23	486.5	392.5	442.8	440.8
Op24	485.6	464	444.6	471.3
Op25	468.3	476.6	456.7	462.1
Op26	455.9	339.5	442.1	421
Op27	486.4	368.8	445.2	400
Op28	495.6	593.6	451.5	455.6
Op29	490.4	600	427.6	449.5
Op30	462.8	405.7	448.1	412.3
Op31	482.6	445.3	451.5	464.8
Op32	444.8	381.3	451.5	445.5
Op33	515	404.3	430.2	413.5
Op34	450.1	342.7	438.8	453.6
Op35	442.1	400.7	455	449.9
Op36	457.6	364.4	436.8	440.1
Op37	479.8	482.9	449.5	459.4
Op38	488.5	453.8	444.8	429.2
Op39	425.3	477.3	447	436.8
Op40	475.4	554.1	447	470.5
Tiempo total	18710.1	17519.5	17823.3	17639.3

Tabla C.2: Resultados r40801-2

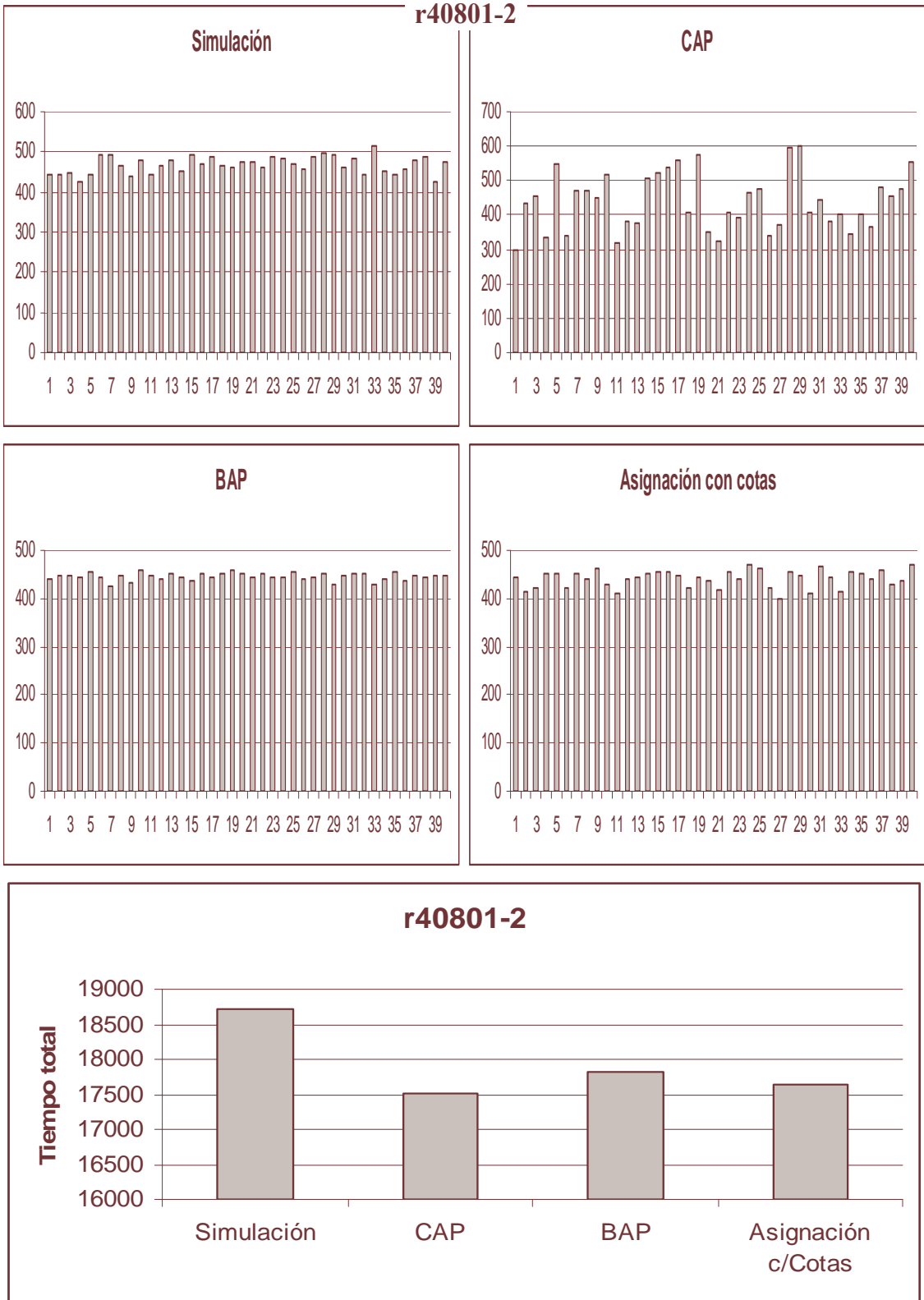


Figura C.12: r40801-2

r40801-3	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	453.3	254.3	443	427.4
Op2	430.1	445.9	434.2	425.2
Op3	429.3	430.8	435.9	395.9
Op4	449.8	309.6	436.2	427
Op5	421.5	494.5	446.9	449.3
Op6	475.9	335.9	426.4	417.2
Op7	483.8	465.5	425.6	428.7
Op8	488.2	407	456.1	423.1
Op9	478.2	496.4	433.5	443.7
Op10	485.1	510.8	422.9	403.8
Op11	475.3	311.7	429.9	391.1
Op12	461.4	343.5	443.7	425.7
Op13	454.6	364.8	442.8	422.3
Op14	429.8	523.3	431.3	429
Op15	482.2	525.2	446.8	452.1
Op16	442.2	507.2	440	441.4
Op17	464.5	528.3	436.4	449.7
Op18	469.7	405.8	429.2	406.4
Op19	450	571.8	442.2	431.4
Op20	477.3	357.6	436.7	438.5
Op21	449	306.4	413.6	403.3
Op22	445.8	398.6	445.4	440.5
Op23	450.2	394.2	439.1	419
Op24	462	425.1	427	462.2
Op25	488.2	489.7	429.1	446.1
Op26	452	410.7	441.9	429.1
Op27	485.4	358.3	423.1	393.1
Op28	456.2	484.8	435.2	436.2
Op29	439.4	564.5	428.6	434.8
Op30	449.4	316.3	421.9	420.3
Op31	446.7	348.8	446.7	437
Op32	433.7	363.8	450	417.5
Op33	429.7	407.1	421.1	410
Op34	421.2	413.8	424.4	437.1
Op35	419.8	395.7	424.8	429.9
Op36	434.3	343.1	435	425.7
Op37	431.6	516.9	432.1	423.9
Op38	474.2	486.4	437.9	432.7
Op39	487.1	478.6	439.5	439
Op40	454.7	519.3	433.5	456.8
Tiempo total	18212.8	17012	17389.6	17123.1

Tabla C.3: Resultados r40801-3

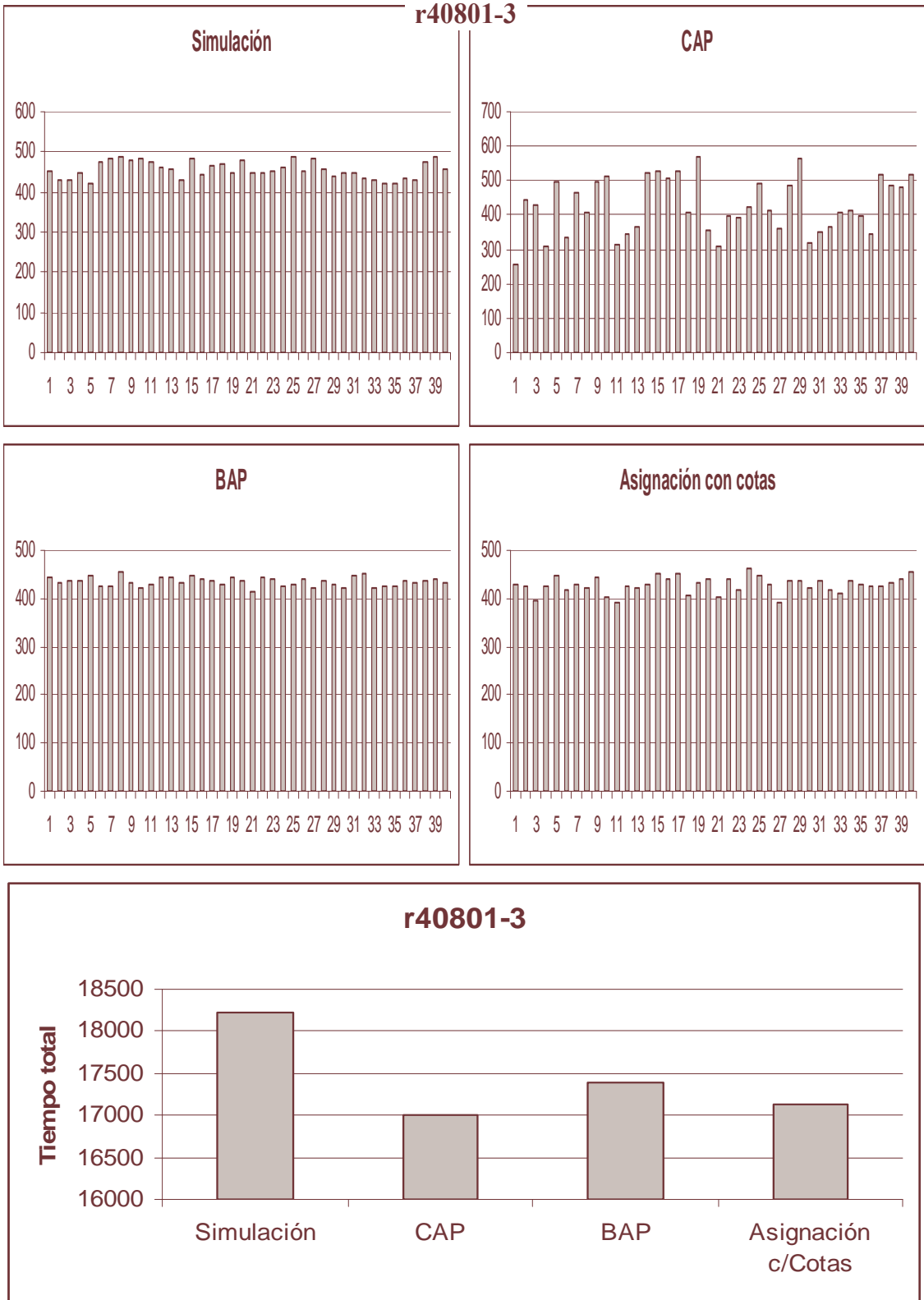


Figura C.13: r40801-3

r40802-1	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	473.4	438	469.7	468.6
Op2	484.5	550.8	463.9	466.4
Op3	472.3	409.8	453.9	437.8
Op4	475.7	437.9	463.5	459.5
Op5	473.8	472.6	465.7	441
Op6	440.5	403.6	458.4	443.1
Op7	465.6	502.4	459.4	462.2
Op8	504.2	456	456.4	467.9
Op9	457.4	444.3	472.6	471.7
Op10	457.4	514.6	469.4	478.2
Op11	452.1	456.6	452.1	442.1
Op12	450.9	433.6	459.7	448.4
Op13	459.1	455.4	475.3	464.5
Op14	478.2	518.9	468.6	476.9
Op15	474.5	525.7	476.6	469.2
Op16	445.3	387	461.2	460.6
Op17	473.1	452	443	475.5
Op18	454.4	391.8	467.5	452.8
Op19	489.8	494.9	469.3	467.9
Op20	463.2	492.8	462.4	461.8
Op21	468.9	445.6	469.3	461.8
Op22	477.2	506.6	467.9	467.6
Op23	447	483.1	466.1	453.1
Op24	497.2	420.2	453.5	455.7
Op25	501.3	427.9	460.9	452.5
Op26	488.3	421.2	458.6	456.6
Op27	459	372.4	445.4	442
Op28	495.2	495.9	470.4	449.1
Op29	479.8	469.4	477.9	483.3
Op30	498.6	443.6	455.1	449.2
Op31	492.8	438.8	456.6	462.6
Op32	458.7	406.2	478.1	464.1
Op33	488.4	397.8	459.1	449.3
Op34	444.4	463.6	466.2	477.9
Op35	464.8	423.7	473.6	457.2
Op36	472.3	449.2	462.7	467
Op37	479.7	472.5	465.2	460.6
Op38	462.8	422.1	436.7	425.9
Op39	494.2	457.2	462.7	469.6
Op40	482.5	469.4	478.2	464.9
Tiempo total	18898.5	18125.1	18532.8	18386.1

Tabla C.4: Resultados r40802-1

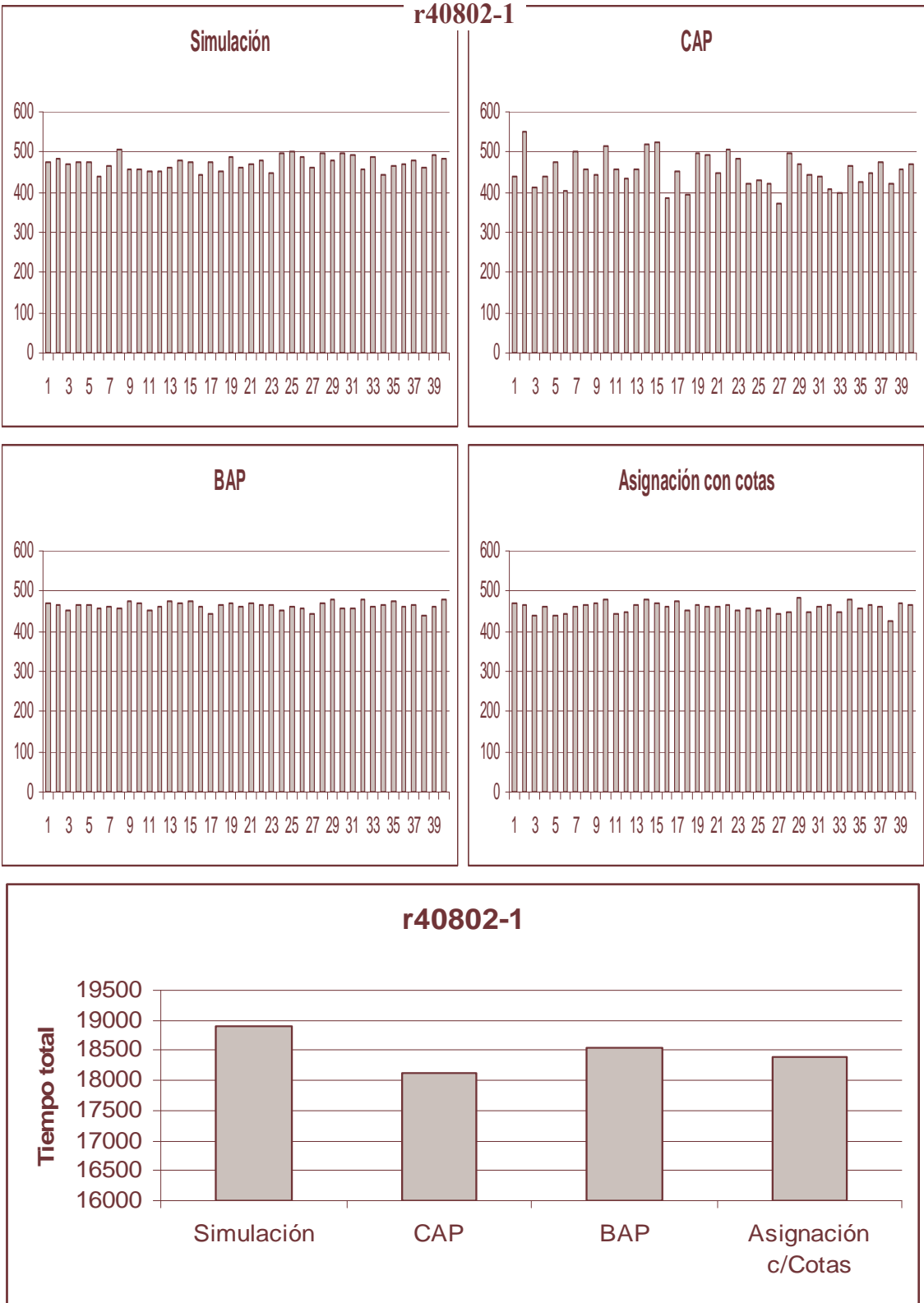


Figura C.14: r40802-1

r40802-2	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	496.8	391.6	446.5	451.5
Op2	475.9	516.2	483.6	465.9
Op3	459.4	443.3	467.7	459.9
Op4	474.2	492.1	477.5	499.4
Op5	446.4	464.2	473.1	473.3
Op6	455.7	460.8	465.2	468.5
Op7	467	454.4	458	455.1
Op8	497.4	405.4	457.4	454.3
Op9	457.7	485	461.8	468.9
Op10	468.4	494	466.9	422.2
Op11	485.7	395.4	453.2	467.9
Op12	491.5	403.6	458.7	457.6
Op13	490.5	505.2	473.7	482.3
Op14	495.1	450	449.2	450.1
Op15	478.2	504.2	492.1	479.8
Op16	478	457	468.6	470.2
Op17	509	454	459.7	458.3
Op18	472.2	444	480.3	470.9
Op19	499.9	506.9	483.1	489
Op20	468.6	461.6	455.1	468.4
Op21	480.8	381.5	463.9	431.2
Op22	515.7	469.5	481.7	463.3
Op23	475.5	440.2	458.5	447.1
Op24	493.1	483.8	473.4	458.8
Op25	473.6	440.4	438.4	472.3
Op26	480.6	466.4	472.8	459.9
Op27	510.1	401.8	456.4	463.7
Op28	469.1	464.2	480.8	477.6
Op29	454.3	537.7	492.8	469.1
Op30	473.3	401.9	470.5	457.8
Op31	484	437.6	455.3	455.4
Op32	477.9	456.3	473	476.5
Op33	482.5	387.2	460.5	452.1
Op34	465.6	451.8	470.5	494.8
Op35	479.1	453	479.6	453.6
Op36	468.2	505.7	495.6	491.5
Op37	484.6	444.3	465.3	461.1
Op38	474.2	482.6	464.5	450.1
Op39	485.6	491.9	471.9	474
Op40	444.8	523.2	467.5	465.9
Tiempo total	19140.2	18309.9	18724.3	18589.3

Tabla C.5: Resultados r40802-2

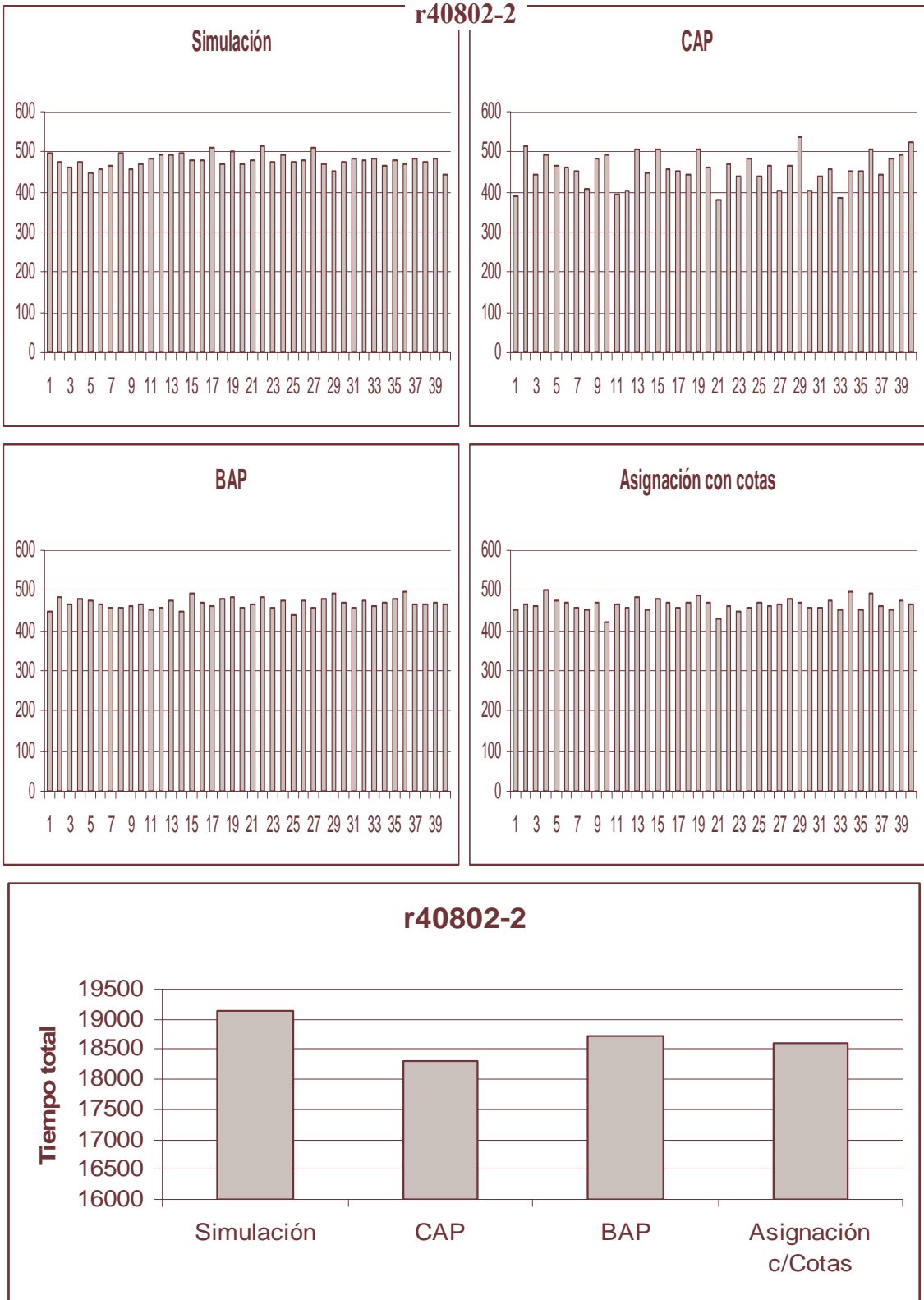


Figura C.15: r40802-2

r40802-3	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	444.7	447.6	446.7	445.1
Op2	441	439.6	452.2	451.2
Op3	450.1	408.1	447.5	420.7
Op4	455.7	440.5	424.1	463.4
Op5	458.9	493.4	441.9	434.4
Op6	486.7	403.2	454.9	436.4
Op7	447.6	445.3	437.8	415.9
Op8	441.8	414.4	433.5	416
Op9	475.9	438.2	448.6	454
Op10	476.2	441.6	441.2	452
Op11	425.8	434.6	449.6	434.3
Op12	427.4	378.8	419	410.1
Op13	480.3	464.2	438.1	428.7
Op14	448.2	452.2	435.2	431.7
Op15	444.4	465.9	434.1	453.9
Op16	441.5	409.5	455.2	433.5
Op17	462.7	411.6	447.9	440.3
Op18	440.3	411.7	433.9	426.3
Op19	464	488.7	448.8	450.7
Op20	461.7	418	431	425.7
Op21	448.6	383.1	454	444.2
Op22	470.7	439	446.9	444.2
Op23	458.7	411.8	436	424.1
Op24	438.1	458	433.9	446.2
Op25	474.5	410	456.7	454.3
Op26	450.4	476.7	446.5	450.9
Op27	425	394	427.7	416.7
Op28	435.3	403.2	424.1	413.2
Op29	458.8	445.5	432.1	439.2
Op30	467.5	402.9	450.5	412.1
Op31	406.1	412	431.9	409.5
Op32	429.9	409.9	459.4	456.2
Op33	436.2	374.1	439.4	417.8
Op34	441.6	431	444.6	446.1
Op35	444.3	482.7	441.3	449.5
Op36	459.2	450.2	441.9	431.6
Op37	479.3	430.6	420.1	440.3
Op38	436.3	396	440.9	431.8
Op39	434.3	439.1	450	444.7
Op40	433.8	446.8	430.7	463.3
Tiempo total	18003.5	17203.7	17629.8	17460.2

Tabla C.6: Resultados r40802-3

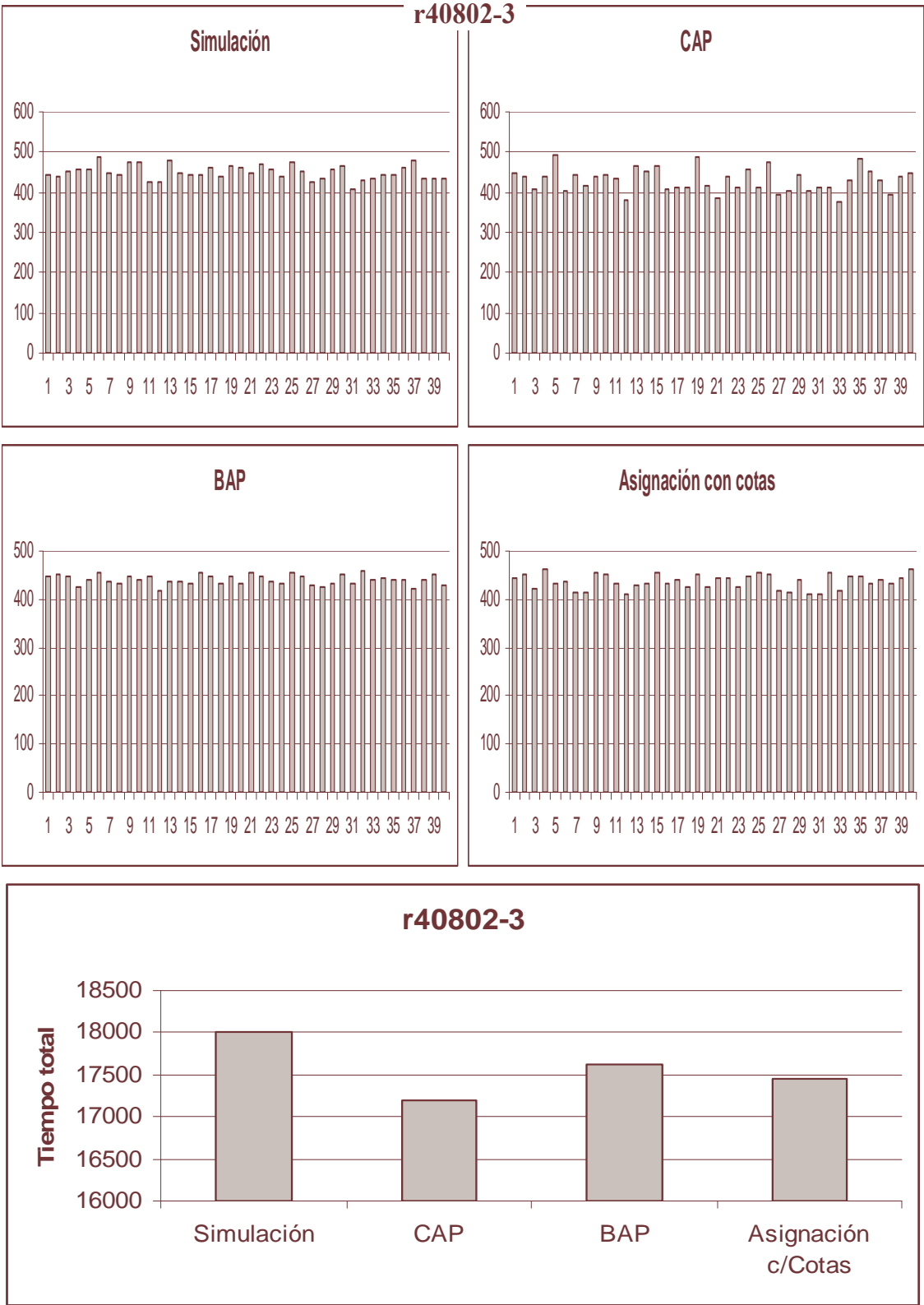


Figura C.16: r40802-3

r40803-1	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	418.8	221	457.3	457.3
Op2	447.1	513.4	442	442
Op3	458.7	448.8	431.8	431.8
Op4	461.1	265.2	430.1	430.1
Op5	431.3	642.6	494.7	494.7
Op6	464.7	363.8	433.5	433.5
Op7	507	397.8	515.1	515.1
Op8	468	302.6	419.9	419.9
Op9	463.6	374	374	374
Op10	442.8	550.8	375.7	375.7
Op11	488	324.7	418.2	418.2
Op12	420.3	316.2	436.9	436.9
Op13	432.5	248.2	431.8	431.8
Op14	474.2	537.2	382.5	382.5
Op15	441.5	608.6	462.4	462.4
Op16	459	567.8	465.8	465.8
Op17	446.8	635.8	447.1	447.1
Op18	478.1	374	374	374
Op19	476.2	595	414.8	414.8
Op20	450.6	278.8	426.7	426.7
Op21	424.7	340	397.8	397.8
Op22	427.5	312.8	477.7	477.7
Op23	466.1	370.6	370.6	370.6
Op24	481.6	479.4	479.4	479.4
Op25	493.9	635.8	455.6	455.6
Op26	440.3	214.2	409.7	409.7
Op27	486.7	367.2	379.1	379.1
Op28	473	486.2	486.2	486.2
Op29	479.4	635.8	428.4	428.4
Op30	412.1	224.4	396.1	396.1
Op31	428.3	363.8	406.3	406.3
Op32	403.5	357	453.9	453.9
Op33	440.3	443.7	389.3	389.3
Op34	432.3	295.8	430.1	430.1
Op35	452.1	360.4	392.7	392.7
Op36	449.1	214.2	406.3	406.3
Op37	509	588.2	408	408
Op38	405.5	567.8	452.2	452.2
Op39	441.1	537.2	379.1	379.1
Op40	456.6	516.8	372.3	372.3
Tiempo total	18133.4	16877.6	17005.1	17005.1

Tabla C.7: Resultados r40803-1

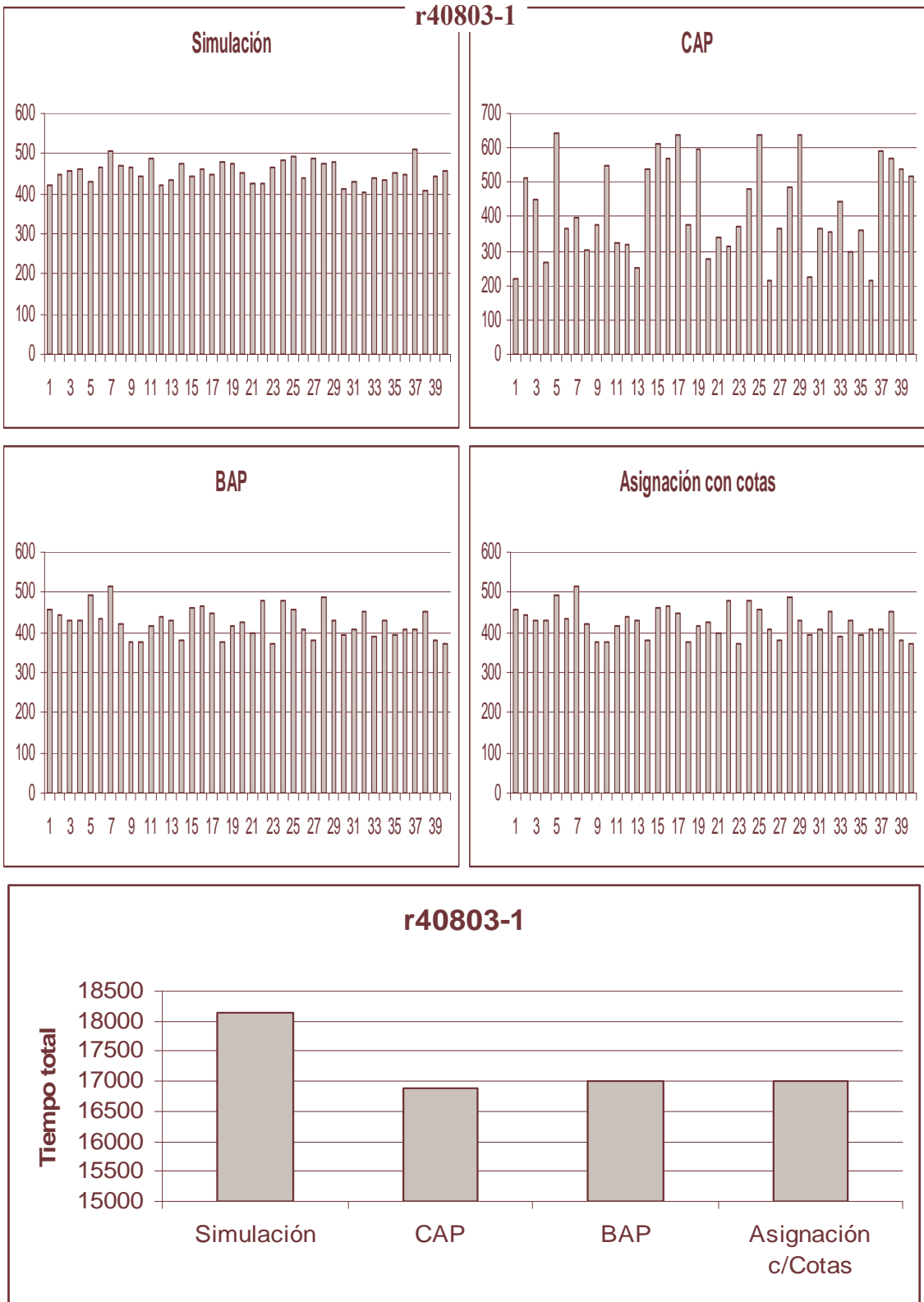


Figura C.17: r40803-1

r40803-2	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	417.2	221	457.3	457.3
Op2	464.9	418.2	418.2	418.2
Op3	457.4	448.8	408	408
Op4	467.5	265.2	430.1	430.1
Op5	490.2	642.6	460.7	460.7
Op6	451.5	329.8	377.4	377.4
Op7	432.5	397.8	515.1	515.1
Op8	424.6	302.6	419.9	419.9
Op9	424.1	374	455.6	455.6
Op10	433.5	533.8	392.7	392.7
Op11	456.5	231.2	368.9	368.9
Op12	434	316.2	447.1	447.1
Op13	485	248.2	431.8	431.8
Op14	448.8	537.2	370.6	370.6
Op15	461.7	608.6	443.7	443.7
Op16	462.2	567.8	394.4	394.4
Op17	454.2	635.8	447.1	447.1
Op18	415.4	374	374	374
Op19	459.1	595	414.8	414.8
Op20	482.1	278.8	374	374
Op21	455	340	397.8	397.8
Op22	438.1	312.8	435.2	435.2
Op23	466	370.6	382.5	382.5
Op24	458.3	629	479.4	479.4
Op25	472.6	635.8	431.8	431.8
Op26	439.4	214.2	394.4	394.4
Op27	445.9	394.4	379.1	379.1
Op28	487	343.4	486.2	486.2
Op29	419.4	635.8	428.4	428.4
Op30	455	224.4	375.7	375.7
Op31	444.5	363.8	501.5	501.5
Op32	477.1	357	453.9	453.9
Op33	473.9	443.7	368.9	368.9
Op34	457.9	484.5	416.5	416.5
Op35	480.1	360.4	392.7	392.7
Op36	433.2	214.2	416.5	416.5
Op37	472.7	588.2	476	476
Op38	456.1	567.8	465.8	465.8
Op39	445.1	537.2	379.1	379.1
Op40	448.6	533.8	516.8	516.8
Tiempo total	18148.3	16877.6	16979.6	16979.6

Tabla C.8: Resultados r40803-2

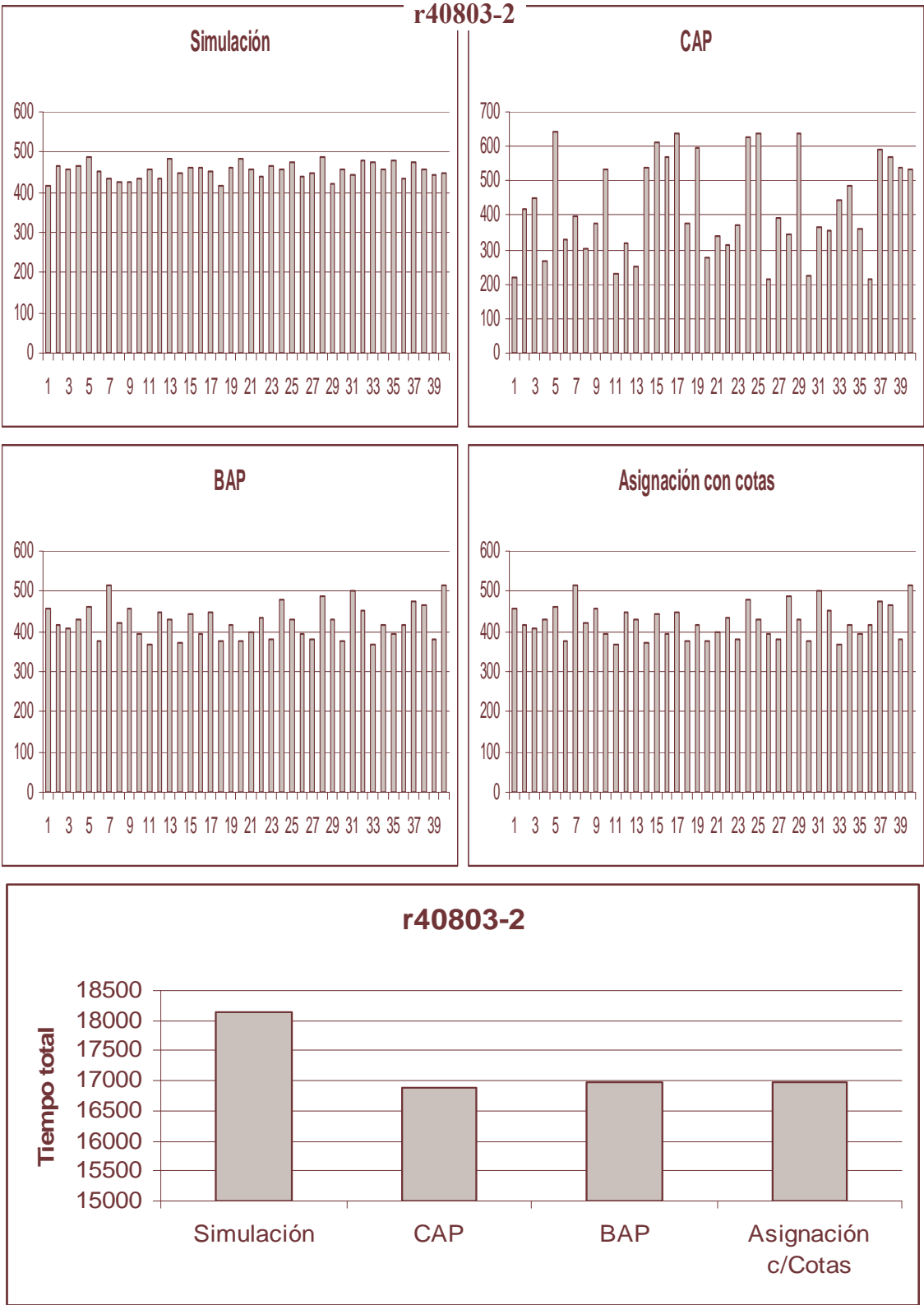


Figura C.18: r40803-2

r40803-3	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	464.2	224.4	457.3	457.3
Op2	441.4	418.2	435.2	418.2
Op3	465.5	448.8	431.8	431.8
Op4	433.4	265.2	443.7	453.9
Op5	448.1	642.6	459	460.7
Op6	490.1	363.8	443.7	482.8
Op7	462.2	411.4	408	384.2
Op8	442.7	302.6	462.4	419.9
Op9	439.3	374	467.5	374
Op10	393.7	533.8	453.9	516.8
Op11	484.8	231.2	414.8	368.9
Op12	455.1	316.2	469.2	436.9
Op13	429	248.2	462.4	431.8
Op14	458.4	605.2	453.9	370.6
Op15	446.5	608.6	459	462.4
Op16	472.4	567.8	450.5	465.8
Op17	440.5	635.8	460.7	447.1
Op18	497.5	384.2	416.5	374
Op19	508.3	595	367.2	445.4
Op20	450.5	278.8	426.7	426.7
Op21	458.1	280.5	450.5	397.8
Op22	484.3	312.8	270.3	435.2
Op23	428.8	370.6	447.1	389.3
Op24	420.1	479.4	435.2	479.4
Op25	457.7	635.8	431.8	431.8
Op26	472.4	214.2	462.4	394.4
Op27	466.3	367.2	363.8	469.2
Op28	446.9	486.2	357	486.2
Op29	490.8	635.8	423.3	428.4
Op30	417.7	396.1	399.5	396.1
Op31	478.9	363.8	406.3	406.3
Op32	399.4	357	453.9	435.2
Op33	455.8	472.6	428.4	368.9
Op34	422.3	363.8	367.2	416.5
Op35	453.4	360.4	469.2	414.8
Op36	486.2	214.2	431.8	406.3
Op37	448.3	588.2	357	375.7
Op38	448.7	452.2	465.8	465.8
Op39	455.2	537.2	426.7	379.1
Op40	450.3	533.8	391	372.3
Tiempo total	18165.2	16877.6	17081.6	16977.9

Tabla C.9: Resultados r40803-3

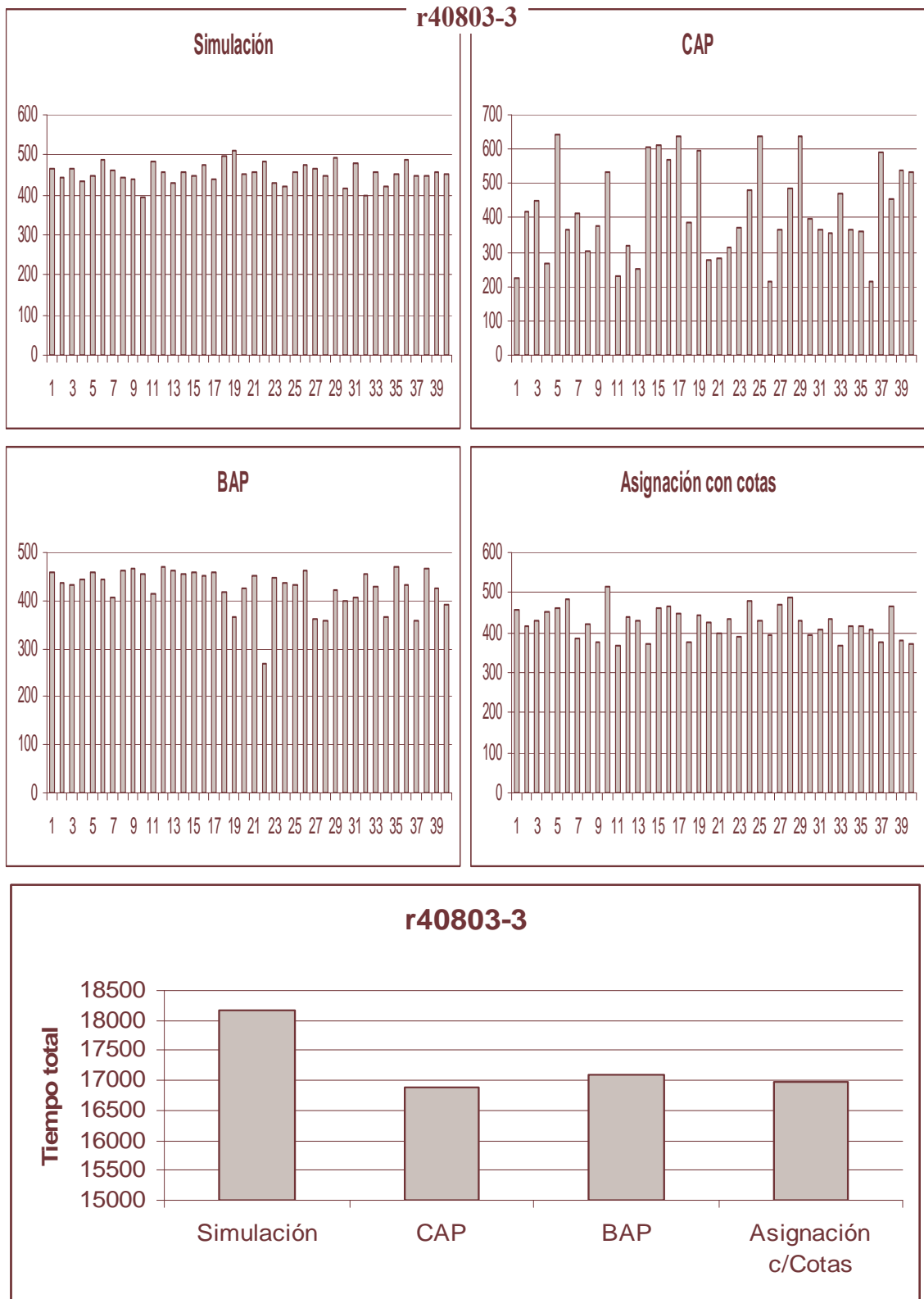


Figura C.19: r40803-3

r40804-1	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	435.2	435.2	435.2	435.2
Op2	421.6	421.6	421.6	421.6
Op3	387.6	387.6	387.6	387.6
Op4	411.4	411.4	411.4	411.4
Op5	431.8	431.8	431.8	431.8
Op6	384.2	384.2	384.2	384.2
Op7	394.4	394.4	394.4	394.4
Op8	428.4	428.4	428.4	428.4
Op9	374	374	374	374
Op10	411.4	411.4	411.4	411.4
Op11	418.2	418.2	418.2	418.2
Op12	421.6	421.6	421.6	421.6
Op13	425	425	425	425
Op14	438.6	438.6	438.6	438.6
Op15	394.4	394.4	394.4	394.4
Op16	421.6	421.6	421.6	421.6
Op17	421.6	421.6	421.6	421.6
Op18	431.8	431.8	431.8	431.8
Op19	411.4	411.4	411.4	411.4
Op20	374	374	374	374
Op21	435.2	435.2	435.2	435.2
Op22	435.2	435.2	435.2	435.2
Op23	435.2	435.2	435.2	435.2
Op24	397.8	397.8	397.8	397.8
Op25	387.6	387.6	387.6	387.6
Op26	404.6	404.6	404.6	404.6
Op27	408	408	408	408
Op28	411.4	411.4	411.4	411.4
Op29	387.6	387.6	387.6	387.6
Op30	394.4	394.4	394.4	394.4
Op31	421.6	421.6	421.6	421.6
Op32	387.6	387.6	387.6	387.6
Op33	431.8	431.8	431.8	431.8
Op34	414.8	414.8	414.8	414.8
Op35	404.6	404.6	404.6	404.6
Op36	401.2	401.2	401.2	401.2
Op37	374	374	374	374
Op38	401.2	401.2	401.2	401.2
Op39	394.4	394.4	394.4	394.4
Op40	435.2	435.2	435.2	435.2
Tiempo total	16401.6	16401.6	16401.6	16401.6

Tabla C.10: Resultados r40804-1

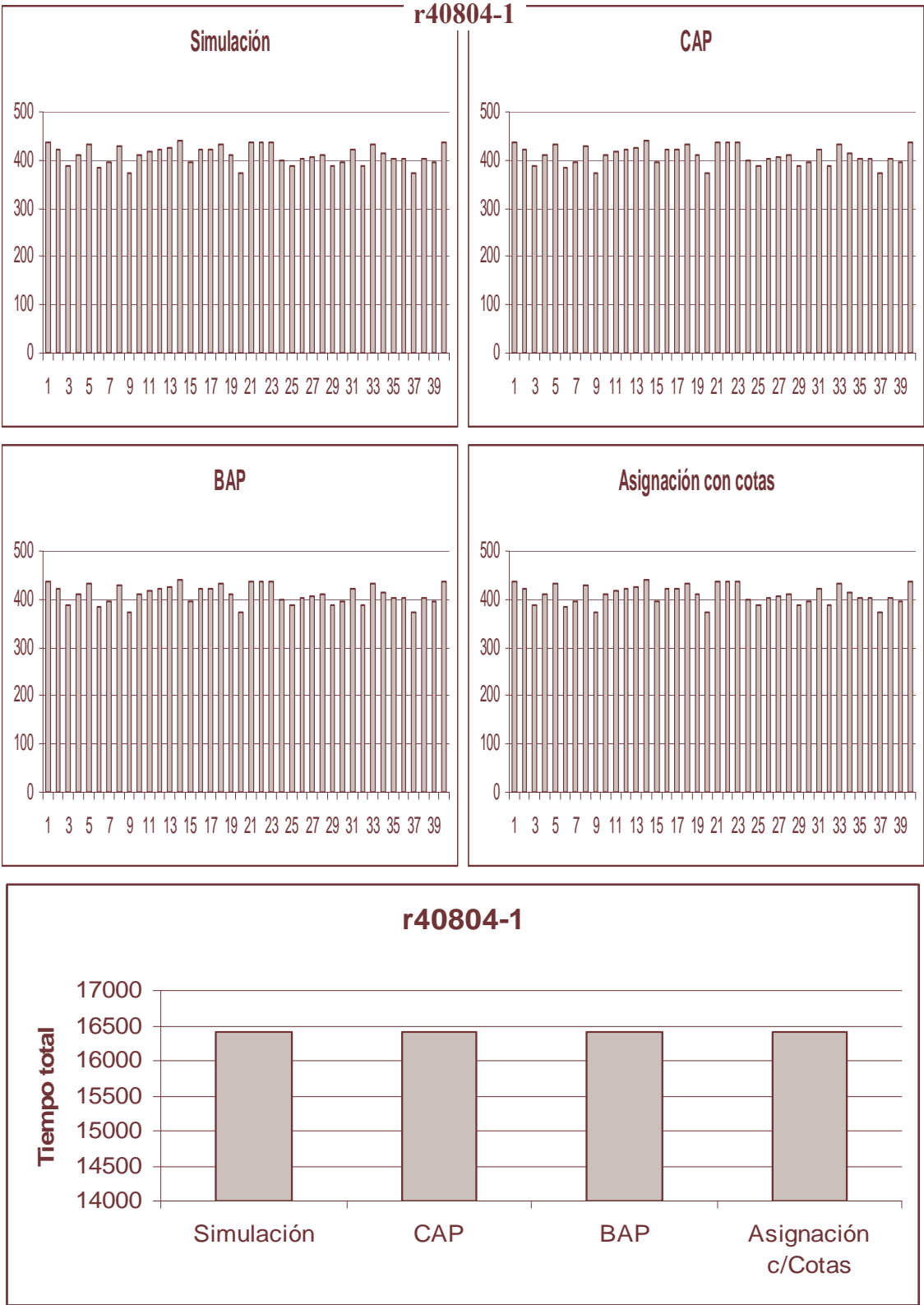


Figura C.20: r40804-1

r40804-2	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	312.8	312.8	312.8	312.8
Op2	272.0	272.0	272.0	272.0
Op3	295.8	295.8	295.8	295.8
Op4	268.6	268.6	268.6	268.6
Op5	258.4	258.4	258.4	258.4
Op6	251.6	251.6	251.6	251.6
Op7	312.8	312.8	312.8	312.8
Op8	299.2	299.2	299.2	299.2
Op9	282.2	282.2	282.2	282.2
Op10	292.4	292.4	292.4	292.4
Op11	292.4	292.4	292.4	292.4
Op12	289.0	289.0	289.0	289.0
Op13	248.2	248.2	248.2	248.2
Op14	306.0	306.0	306.0	306.0
Op15	306.0	306.0	306.0	306.0
Op16	289.0	289.0	289.0	289.0
Op17	258.4	258.4	258.4	258.4
Op18	265.2	265.2	265.2	265.2
Op19	289.0	289.0	289.0	289.0
Op20	299.2	299.2	299.2	299.2
Op21	292.4	292.4	292.4	292.4
Op22	312.8	312.8	312.8	312.8
Op23	275.4	275.4	275.4	275.4
Op24	261.8	261.8	261.8	261.8
Op25	312.8	312.8	312.8	312.8
Op26	275.4	275.4	275.4	275.4
Op27	306.0	306.0	306.0	306.0
Op28	278.8	278.8	278.8	278.8
Op29	306.0	306.0	306.0	306.0
Op30	289.0	289.0	289.0	289.0
Op31	268.6	268.6	268.6	268.6
Op32	261.8	261.8	261.8	261.8
Op33	285.6	285.6	285.6	285.6
Op34	312.8	312.8	312.8	312.8
Op35	295.8	295.8	295.8	295.8
Op36	268.6	268.6	268.6	268.6
Op37	295.8	295.8	295.8	295.8
Op38	278.8	278.8	278.8	278.8
Op39	268.6	268.6	268.6	268.6
Op40	275.4	275.4	275.4	275.4
Tiempo total	11410.4	11410.4	11410.4	11410.4

Tabla C.11: Resultados r40804-2

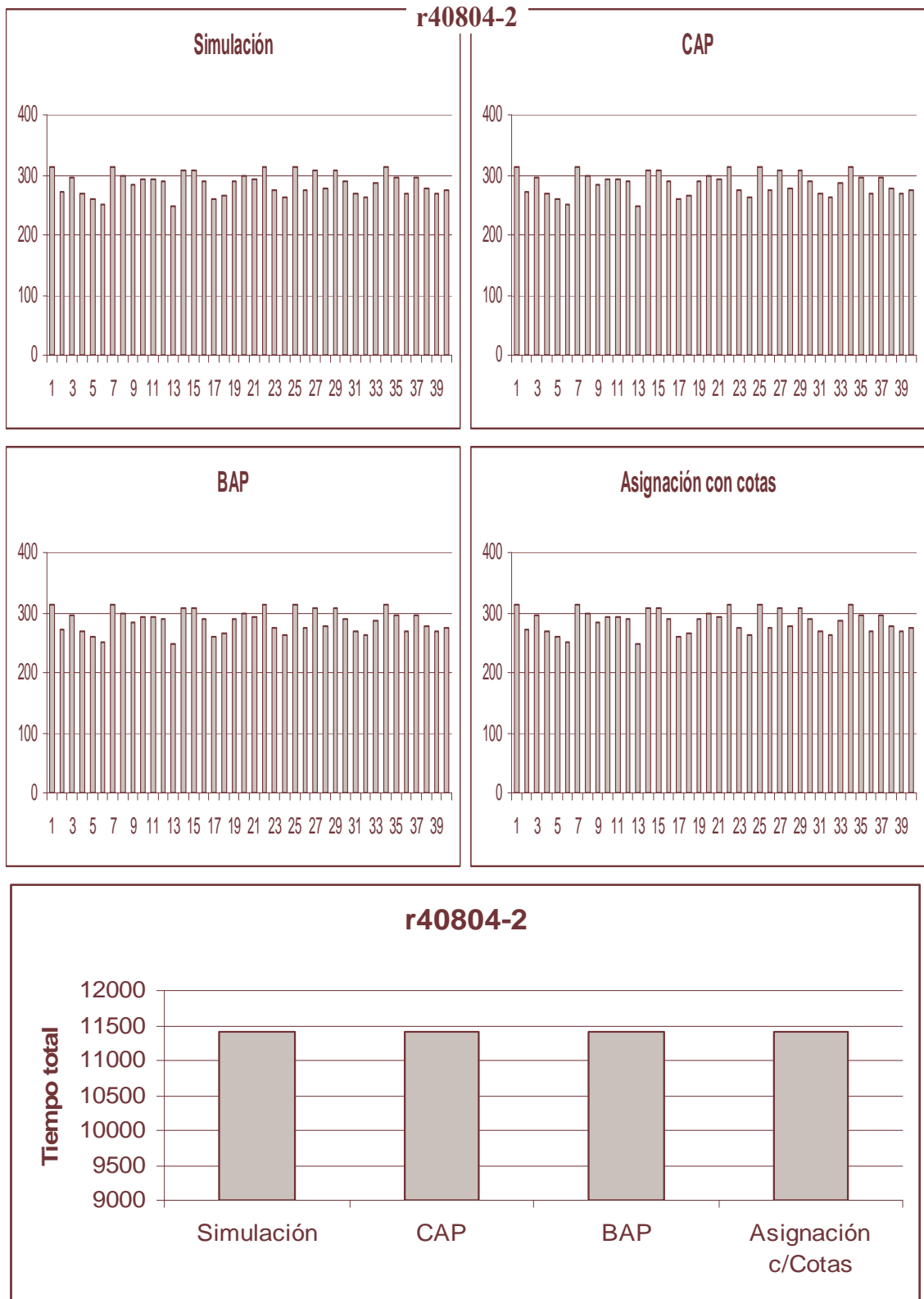


Figura C.21: r40804-2

r40804-3	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	669.8	669.8	669.8	669.8
Op2	693.6	693.6	693.6	693.6
Op3	656.2	656.2	656.2	656.2
Op4	656.2	656.2	656.2	656.2
Op5	693.6	693.6	693.6	693.6
Op6	635.8	635.8	635.8	635.8
Op7	652.8	652.8	652.8	652.8
Op8	697.0	697.0	697.0	697.0
Op9	629.0	629.0	629.0	629.0
Op10	666.4	666.4	666.4	666.4
Op11	659.6	659.6	659.6	659.6
Op12	686.8	686.8	686.8	686.8
Op13	690.2	690.2	690.2	690.2
Op14	646.0	646.0	646.0	646.0
Op15	669.8	669.8	669.8	669.8
Op16	635.8	635.8	635.8	635.8
Op17	669.8	669.8	669.8	669.8
Op18	635.8	635.8	635.8	635.8
Op19	632.4	632.4	632.4	632.4
Op20	639.2	639.2	639.2	639.2
Op21	673.2	673.2	673.2	673.2
Op22	693.6	693.6	693.6	693.6
Op23	686.8	686.8	686.8	686.8
Op24	690.2	690.2	690.2	690.2
Op25	635.8	635.8	635.8	635.8
Op26	646.0	646.0	646.0	646.0
Op27	693.6	693.6	693.6	693.6
Op28	666.4	666.4	666.4	666.4
Op29	646.0	646.0	646.0	646.0
Op30	659.6	659.6	659.6	659.6
Op31	649.4	649.4	649.4	649.4
Op32	639.2	639.2	639.2	639.2
Op33	680.0	680.0	680.0	680.0
Op34	632.4	632.4	632.4	632.4
Op35	632.4	632.4	632.4	632.4
Op36	680.0	680.0	680.0	680.0
Op37	656.2	656.2	656.2	656.2
Op38	663.0	663.0	663.0	663.0
Op39	632.4	632.4	632.4	632.4
Op40	669.8	669.8	669.8	669.8
Tiempo total	26441.8	26441.8	26441.8	26441.8

Tabla C.12: Resultados r40804-3

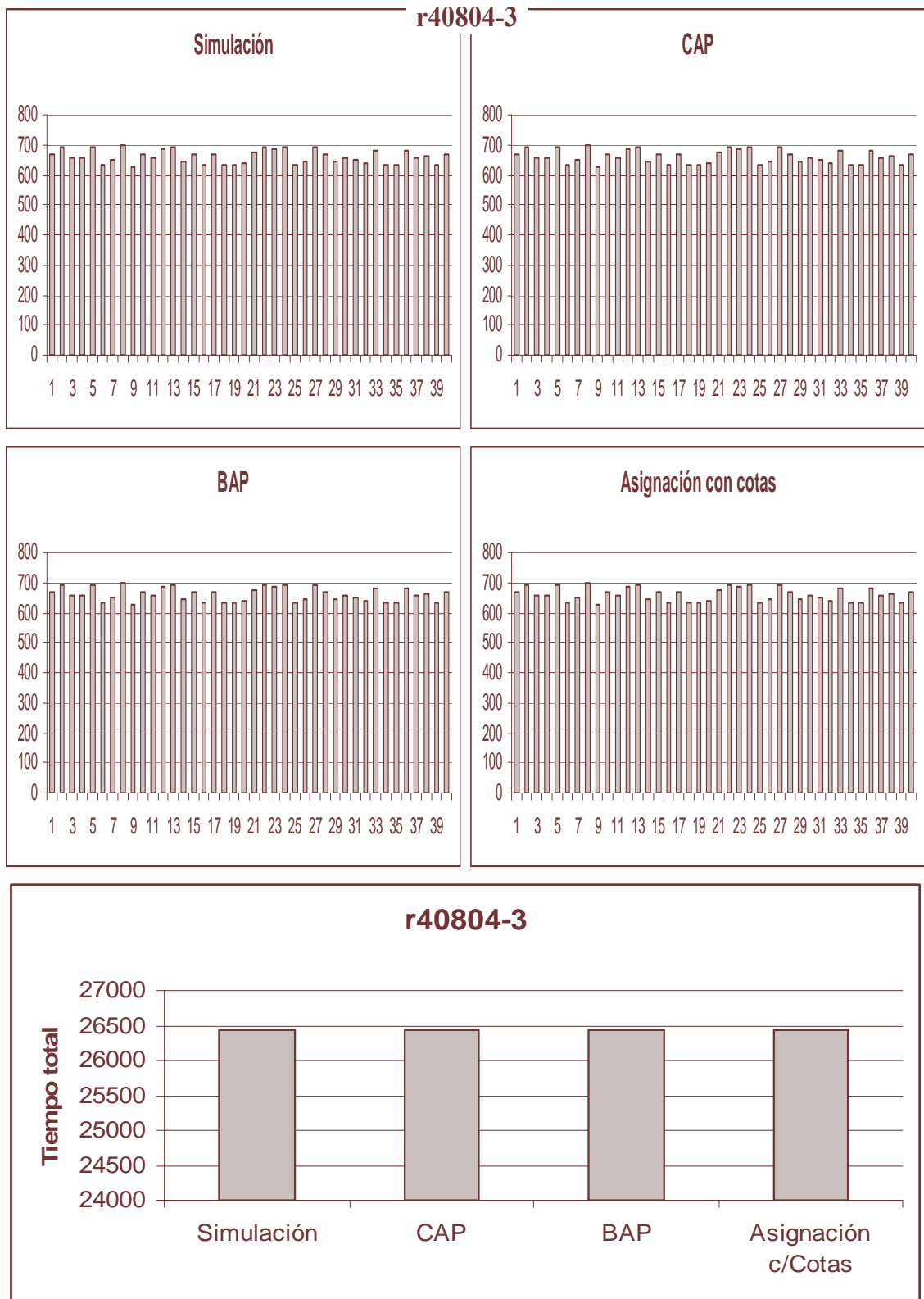


Figura C.22: r40804-3

r40805-1	Asignación			
	Simulación	CAP	BAP	c/Cotas
Op1	398.0	398.0	398.0	398.0
Op2	399.2	402.4	402.4	402.4
Op3	396.0	399.2	399.2	399.2
Op4	403.8	396.4	396.4	396.4
Op5	401.0	396.0	396.0	396.0
Op6	402.4	401.0	401.0	401.0
Op7	396.4	403.8	403.8	403.8
Op8	400.8	400.8	400.8	400.8
Op9	395.6	395.6	395.6	395.6
Op10	400.8	400.8	400.8	400.8
Op11	403.0	403.0	403.0	403.0
Op12	406.2	406.2	406.2	406.2
Op13	411.4	411.4	411.4	411.4
Op14	398.0	398.0	398.0	398.0
Op15	401.0	401.0	401.0	401.0
Op16	398.6	398.6	398.6	398.6
Op17	406.0	406.0	406.0	406.0
Op18	393.8	393.8	393.8	393.8
Op19	397.6	397.6	397.6	397.6
Op20	398.2	398.2	398.2	398.2
Op21	404.8	404.8	404.8	404.8
Op22	406.0	406.0	406.0	406.0
Op23	409.2	409.2	409.2	409.2
Op24	402.4	402.4	402.4	402.4
Op25	402.6	402.6	402.6	402.6
Op26	399.2	399.2	399.2	399.2
Op27	400.8	400.8	400.8	400.8
Op28	407.2	407.2	407.2	407.2
Op29	401.0	401.0	401.0	401.0
Op30	400.4	400.4	400.4	400.4
Op31	390.0	390.0	390.0	390.0
Op32	395.4	395.4	395.4	395.4
Op33	408.2	408.2	408.2	408.2
Op34	399.2	399.2	399.2	399.2
Op35	396.0	396.0	396.0	396.0
Op36	400.2	400.2	400.2	400.2
Op37	400.6	400.6	400.6	400.6
Op38	400.0	400.0	400.0	400.0
Op39	402.6	402.6	402.6	402.6
Op40	404.6	404.6	404.6	404.6
Tiempo total	16038.2	16038.2	16038.2	16038.2

Tabla C.13: Resultados r40805-1

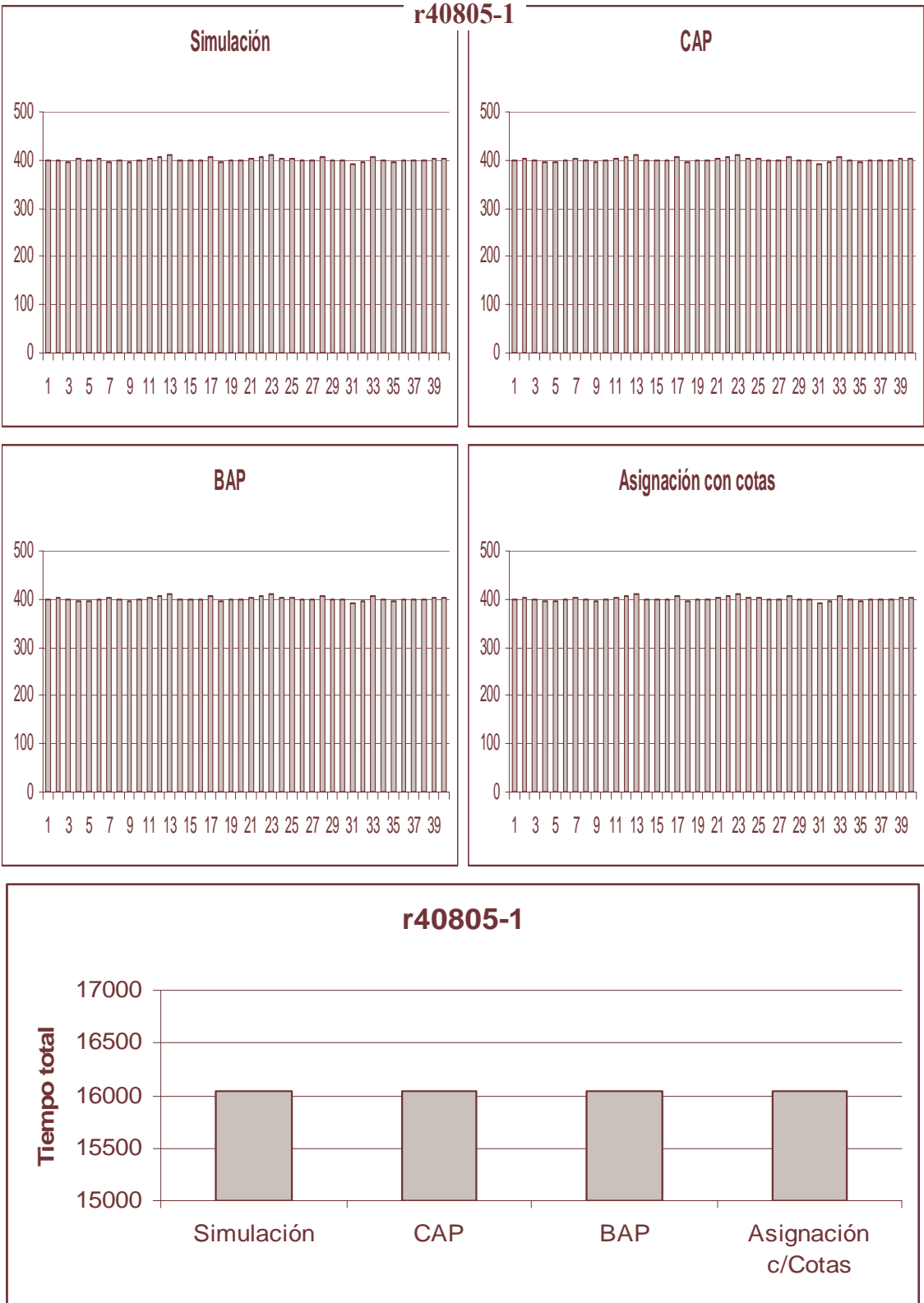


Figura C.23: r40805-1

r40805-2	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	498.4	498.4	498.4	498.4
Op2	484.2	484.2	484.2	484.2
Op3	489.6	489.6	489.6	489.6
Op4	489.2	489.2	489.2	489.2
Op5	485.6	485.6	485.6	485.6
Op6	488.4	488.4	488.4	488.4
Op7	490.0	490.0	490.0	490.0
Op8	489.0	489.0	489.0	489.0
Op9	490.2	490.2	490.2	490.2
Op10	493.2	493.2	493.2	493.2
Op11	483.8	483.8	483.8	483.8
Op12	489.0	489.0	489.0	489.0
Op13	488.2	488.2	488.2	488.2
Op14	486.2	486.2	486.2	486.2
Op15	483.8	483.8	483.8	483.8
Op16	487.0	487.0	487.0	487.0
Op17	487.8	487.8	487.8	487.8
Op18	491.0	491.0	491.0	491.0
Op19	490.2	490.2	490.2	490.2
Op20	498.8	498.8	498.8	498.8
Op21	487.8	487.8	487.8	487.8
Op22	487.0	487.0	487.0	487.0
Op23	487.6	487.6	487.6	487.6
Op24	484.2	484.2	484.2	484.2
Op25	500.4	500.4	500.4	500.4
Op26	490.0	490.0	490.0	490.0
Op27	488.8	488.8	488.8	488.8
Op28	490.4	490.4	490.4	490.4
Op29	484.8	484.8	484.8	484.8
Op30	480.8	480.8	480.8	480.8
Op31	501.8	501.8	501.8	501.8
Op32	484.4	484.4	484.4	484.4
Op33	494.4	494.4	494.4	494.4
Op34	483.2	483.2	483.2	483.2
Op35	485.2	485.2	485.2	485.2
Op36	487.6	487.6	487.6	487.6
Op37	496.2	496.2	496.2	496.2
Op38	490.6	490.6	490.6	490.6
Op39	486.0	486.0	486.0	486.0
Op40	494.0	494.0	494.0	494.0
Tiempo total	19568.8	19568.8	19568.8	19568.8

Tabla C.14: Resultados r40805-2

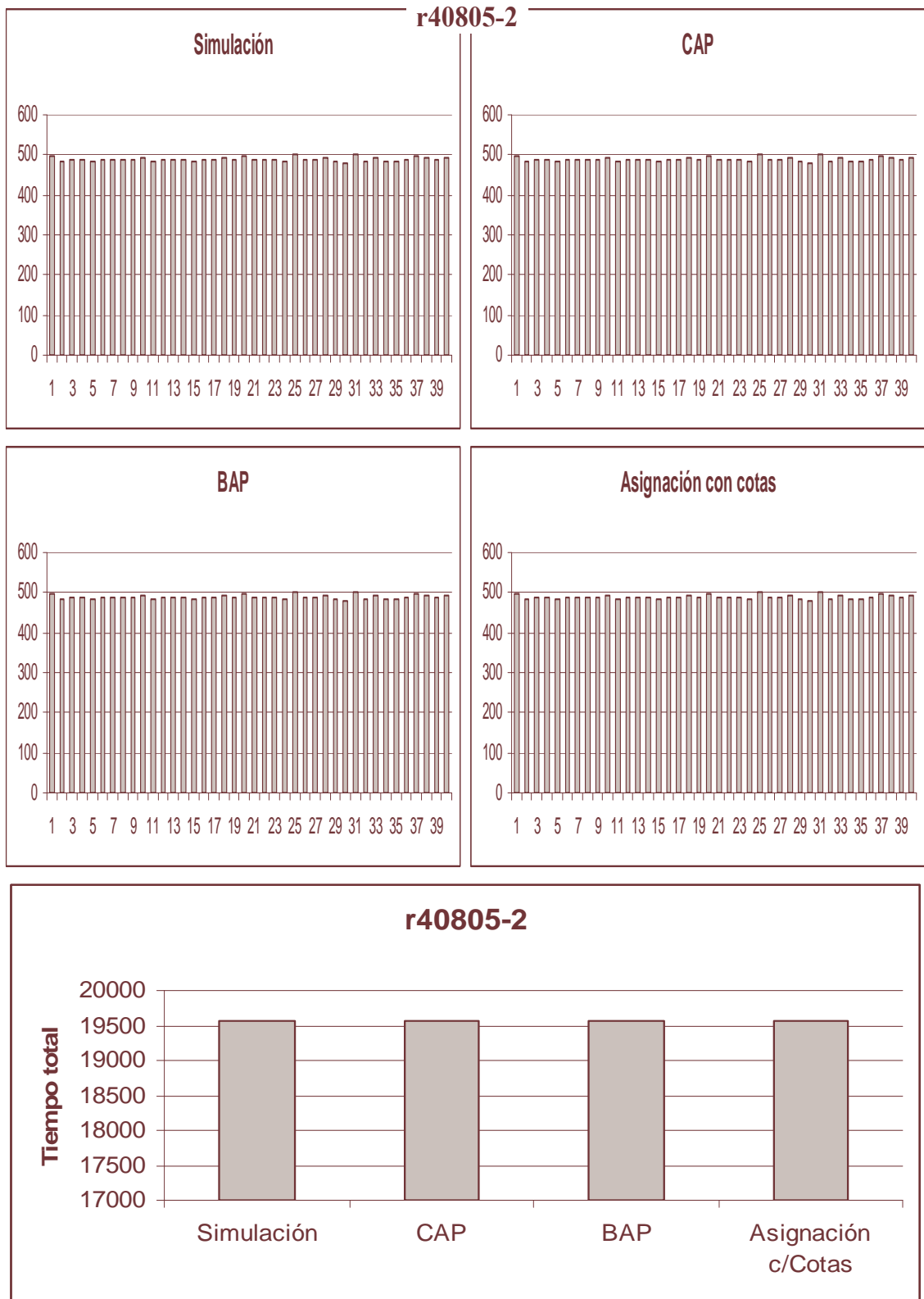


Figura C.24: r40805-2

r40805-3	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	449.8	449.8	449.8	449.8
Op2	450.4	450.4	450.4	450.4
Op3	446.2	446.2	446.2	446.2
Op4	441.8	441.8	441.8	441.8
Op5	446.8	446.8	446.8	446.8
Op6	449.2	449.2	449.2	449.2
Op7	453.8	453.8	453.8	453.8
Op8	443.4	443.4	443.4	443.4
Op9	446.0	446.0	446.0	446.0
Op10	452.6	452.6	452.6	452.6
Op11	445.8	445.8	445.8	445.8
Op12	451.0	451.0	451.0	451.0
Op13	448.4	448.4	448.4	448.4
Op14	447.0	447.0	447.0	447.0
Op15	442.8	442.8	442.8	442.8
Op16	450.2	450.2	450.2	450.2
Op17	456.8	456.8	456.8	456.8
Op18	448.4	448.4	448.4	448.4
Op19	455.6	455.6	455.6	455.6
Op20	456.2	456.2	456.2	456.2
Op21	446.6	446.6	446.6	446.6
Op22	455.0	455.0	455.0	455.0
Op23	449.0	449.0	449.0	449.0
Op24	448.8	448.8	448.8	448.8
Op25	455.4	455.4	455.4	455.4
Op26	450.0	450.0	450.0	450.0
Op27	440.2	440.2	440.2	440.2
Op28	453.8	453.8	453.8	453.8
Op29	443.4	443.4	443.4	443.4
Op30	449.8	449.8	449.8	449.8
Op31	448.4	448.4	448.4	448.4
Op32	453.2	453.2	453.2	453.2
Op33	455.0	455.0	455.0	455.0
Op34	447.4	447.4	447.4	447.4
Op35	445.2	445.2	445.2	445.2
Op36	450.6	450.6	450.6	450.6
Op37	448.4	448.4	448.4	448.4
Op38	441.8	441.8	441.8	441.8
Op39	446.6	446.6	446.6	446.6
Op40	445.2	445.2	445.2	445.2
Tiempo total	17956	17956	17956	17956

Tabla C.15: Resultados r40805-3

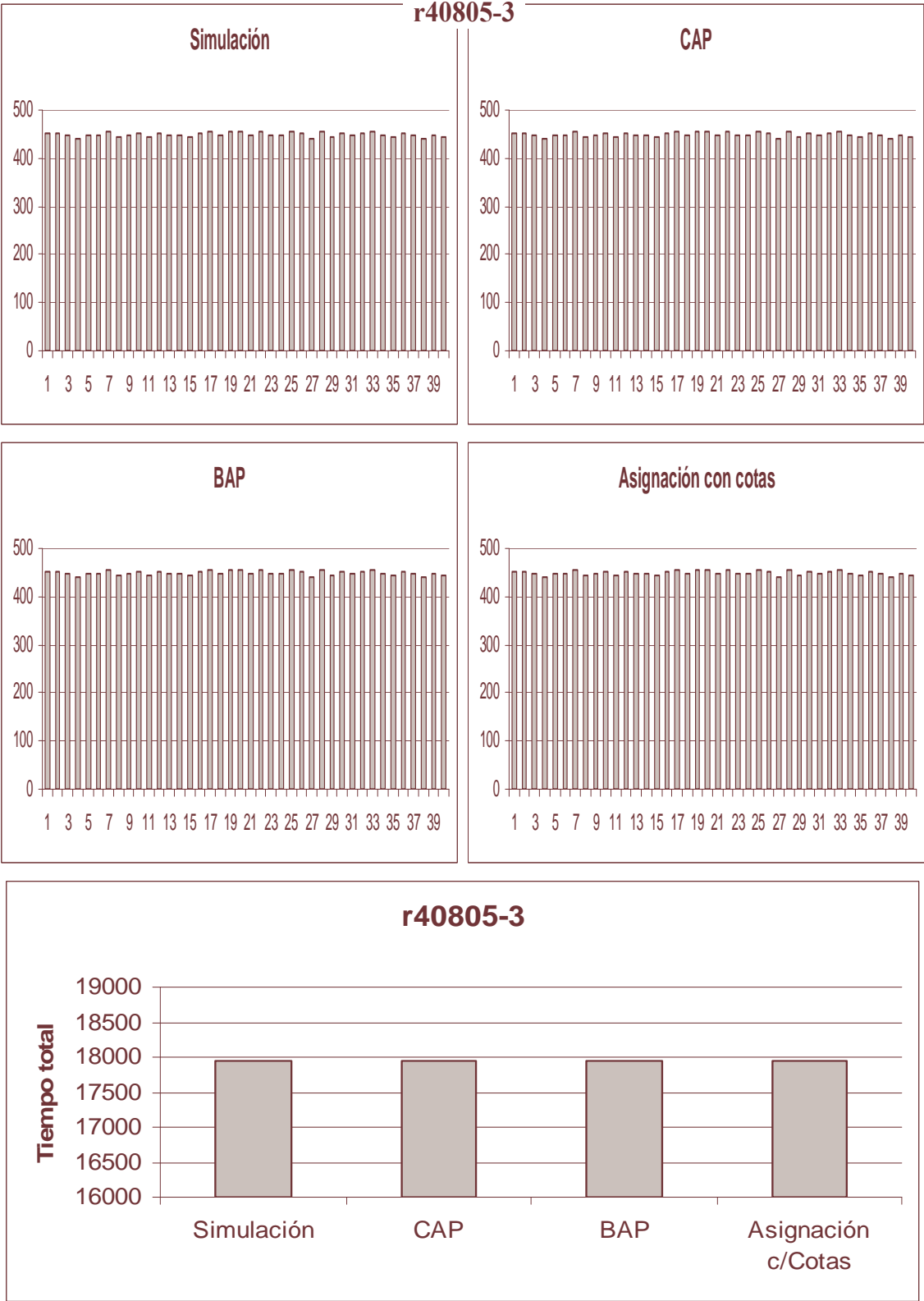


Figura C.25: r40805-3

r40806-1	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	421.4	434.2	460.1	449.6
Op2	443.2	436.6	436.5	442.1
Op3	467.0	430.3	428.1	418.8
Op4	422.8	423.8	442.1	432.7
Op5	424.1	434.2	460.5	434.3
Op6	444.2	436.9	444.8	436.9
Op7	447.6	492.6	421.1	453.7
Op8	448.7	400.8	446.6	417.3
Op9	449.9	432.6	449.8	432.6
Op10	448.6	441.7	438.1	441.7
Op11	439.8	418.4	448.8	448.2
Op12	454.6	398.0	450.7	411.7
Op13	484.5	443.4	460.7	474.2
Op14	477.8	458.6	468.9	453.3
Op15	430.6	453.7	459.7	461.3
Op16	458.9	428.6	452.7	437.0
Op17	434.0	438.8	423.8	441.6
Op18	428.4	422.4	443.7	426.5
Op19	428.0	407.3	422.4	434.7
Op20	460.1	456.6	443.1	446.4
Op21	458.1	448.4	429.5	436.2
Op22	439.3	517.0	457.3	468.4
Op23	437.5	438.4	439.7	438.4
Op24	432.1	426.3	430.5	427.8
Op25	444.8	426.3	421.0	431.4
Op26	422.8	437.2	455.3	429.9
Op27	424.2	448.3	427.0	441.2
Op28	460.5	441.1	424.6	441.1
Op29	445.5	447.5	452.1	458.6
Op30	456.9	430.6	433.4	436.6
Op31	468.9	437.2	449.3	432.9
Op32	447.7	417.7	432.1	424.7
Op33	440.1	419.2	419.4	416.7
Op34	446.4	462.8	457.7	458.9
Op35	427.4	458.6	454.8	447.4
Op36	450.0	419.4	440.0	423.1
Op37	496.4	444.5	462.0	441.3
Op38	426.8	440.2	452.2	448.8
Op39	478.5	422.3	432.2	425.7
Op40	439.3	463.6	444.3	452.1
Tiempo total	17857.4	17536.1	17716.6	17575.8

Tabla C.16: Resultados r40806-1

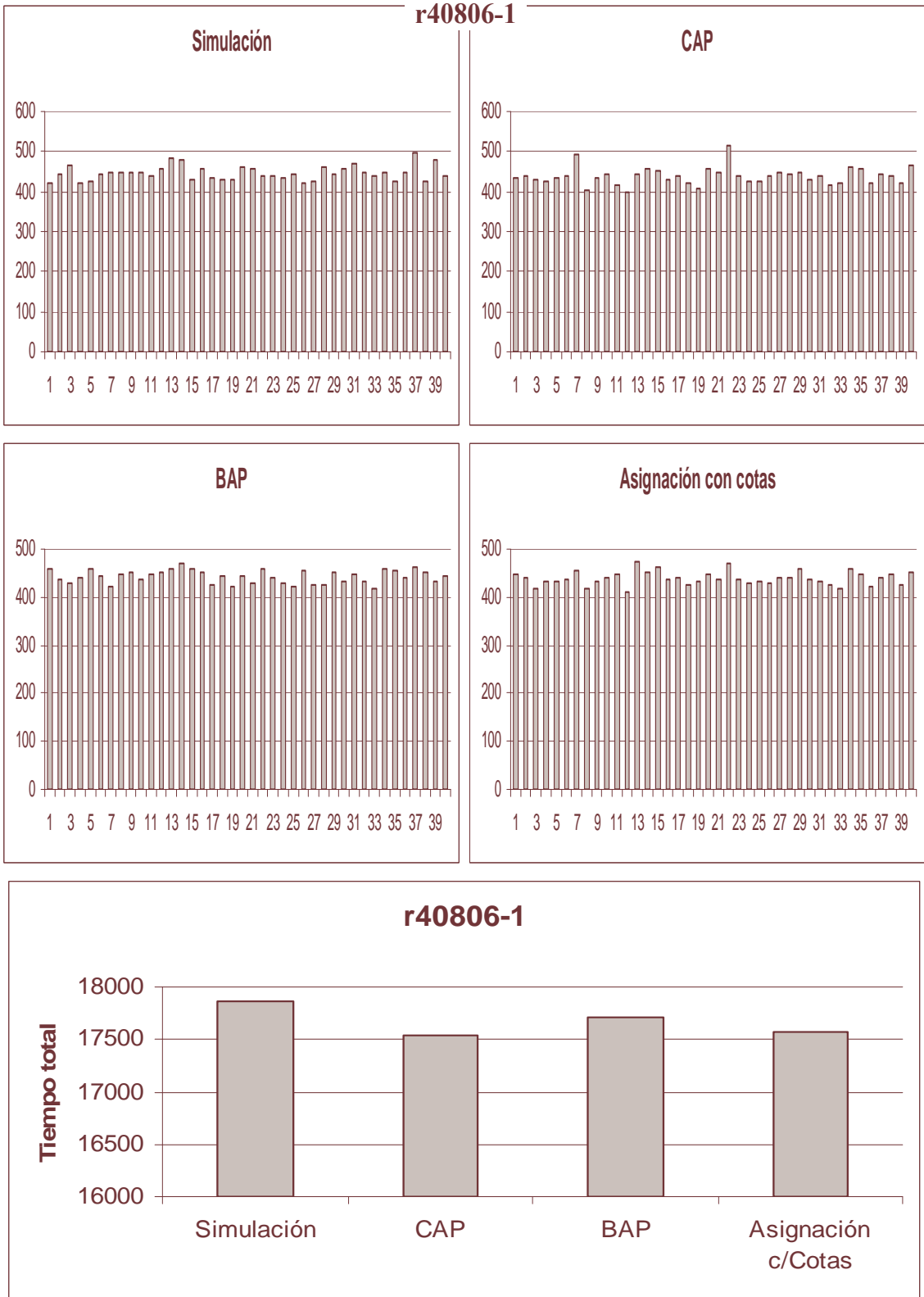


Figura C.26: r40806-1

r40806-2	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	453.7	424.7	432.7	424.9
Op2	454.6	395.3	422.4	423.8
Op3	428.3	454.5	452.2	438.3
Op4	457.0	480.9	430.6	471.8
Op5	433.4	428.0	418.3	433.7
Op6	451.1	438.4	436.7	442.9
Op7	450.9	481.8	463.4	456.6
Op8	478.9	425.4	451.3	431.7
Op9	438.8	425.6	455.7	431.1
Op10	468.1	428.8	429.5	439.1
Op11	418.1	435.5	433.9	429.5
Op12	459.4	438.6	464.2	425.4
Op13	423.5	406.8	454.6	415.8
Op14	460.8	422.5	452.1	431.8
Op15	456.2	460.3	442.3	439.6
Op16	426.7	459.0	458.8	453.4
Op17	447.5	432.4	445.5	432.4
Op18	460.2	424.8	436.3	424.1
Op19	456.1	442.2	434.9	438.8
Op20	419.7	405.4	439.2	418.7
Op21	419.2	443.5	461.4	457.2
Op22	446.0	442.5	444.3	428.1
Op23	450.4	435.2	458.2	429.8
Op24	445.8	438.4	437.9	437.0
Op25	422.3	422.8	436.9	422.8
Op26	427.9	414.3	443.5	431.0
Op27	428.0	462.8	444.9	454.2
Op28	437.5	436.2	438.7	446.0
Op29	435.2	429.2	439.8	429.2
Op30	426.8	432.8	439.6	447.4
Op31	432.7	438.2	440.5	430.7
Op32	461.7	459.4	439.4	463.1
Op33	455.6	462.8	431.8	453.8
Op34	436.9	442.7	426.9	451.6
Op35	457.0	493.2	456.7	469.3
Op36	478.7	442.8	451.9	452.5
Op37	424.6	411.6	436.9	431.2
Op38	425.2	444.9	449.6	431.0
Op39	480.7	421.6	439.0	438.4
Op40	465.1	433.2	443.1	434.6
Tiempo total	17800.08	17519	17715.6	17542.3

Tabla C.17: Resultados r40806-2

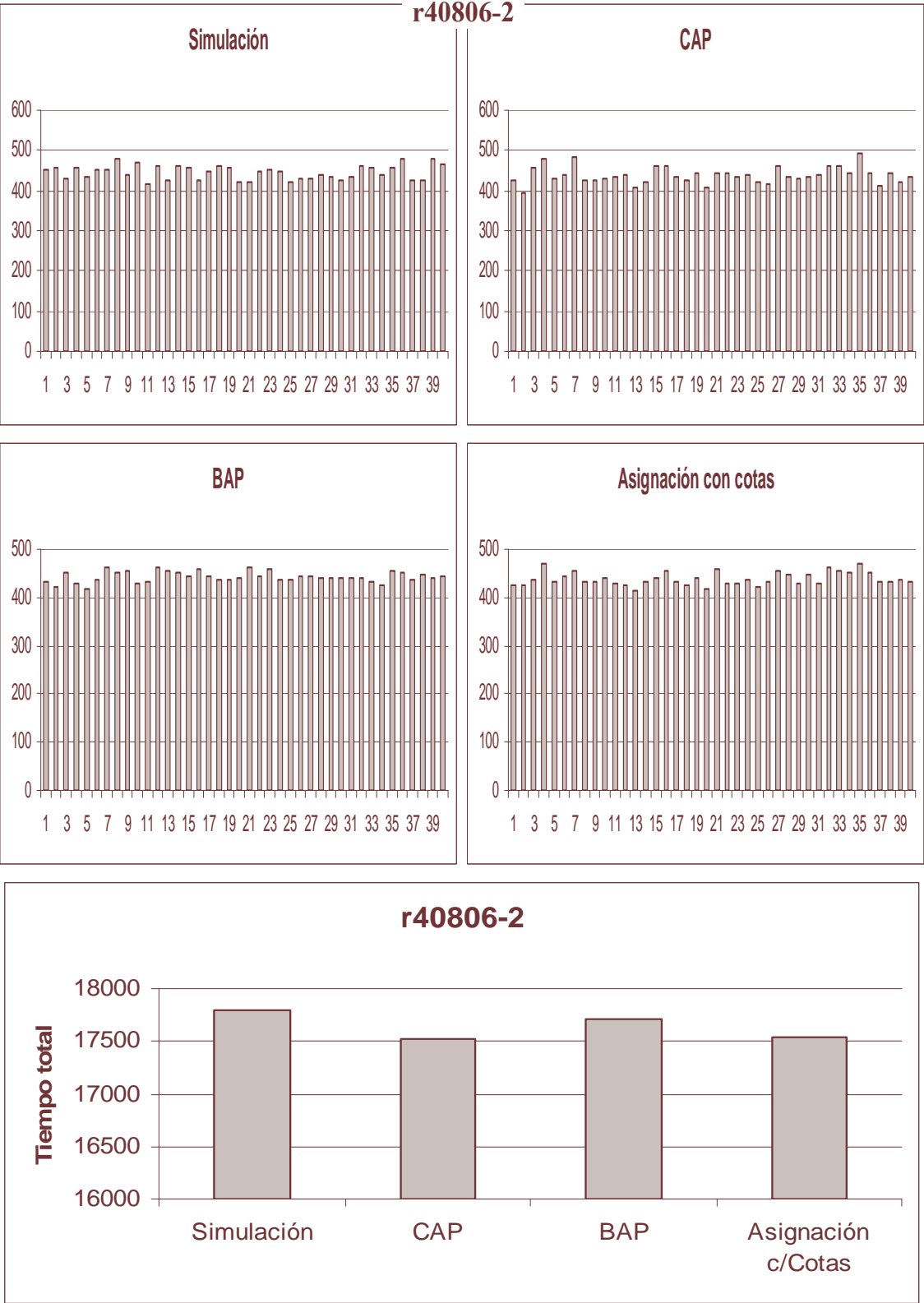


Figura C.27: r40806-2

r40806-3	Simulación	CAP	BAP	Asignación c/Cotas
Op1	444.3	420.8	423.3	422.8
Op2	429.8	442.7	416.9	428.2
Op3	455.4	433.3	452.0	420.3
Op4	422.2	397.3	422.2	411.3
Op5	421.3	428.7	412.3	421.3
Op6	436.5	432.8	433.7	451.3
Op7	428.4	441.4	438.2	445.8
Op8	439.2	441.4	462.8	431.0
Op9	421.4	430.2	436.3	420.2
Op10	478.9	449.9	447.4	450.8
Op11	427.6	423.2	441.1	423.2
Op12	475.9	417.6	440.3	440.3
Op13	446.6	431.1	443.2	429.7
Op14	439.7	434.7	444.8	429.2
Op15	421.2	455.4	454.1	448.0
Op16	443.6	460.2	443.1	451.0
Op17	450.1	466.7	464.2	447.3
Op18	473.3	410.3	432.0	423.6
Op19	462.7	427.7	435.1	440.8
Op20	460.0	431.5	423.8	447.3
Op21	416.9	435.9	421.9	423.5
Op22	436.0	479.9	443.3	468.3
Op23	456.4	436.0	429.5	421.9
Op24	430.2	437.9	451.0	437.9
Op25	439.6	468.8	444.7	434.8
Op26	453.2	456.1	444.8	447.2
Op27	444.8	437.5	443.5	439.0
Op28	462.1	425.7	442.8	433.5
Op29	428.5	395.1	457.2	412.2
Op30	446.1	394.1	441.2	427.4
Op31	461.1	438.4	451.9	443.1
Op32	455.1	419.9	432.1	435.7
Op33	455.5	445.2	443.8	439.6
Op34	428.2	450.5	458.9	473.9
Op35	445.2	416.5	459.0	425.5
Op36	456.2	435.4	439.6	428.1
Op37	427.5	477.8	454.6	475.1
Op38	418.0	443.9	451.7	456.0
Op39	478.2	438.0	453.1	431.9
Op40	447.2	458.8	452.9	462.0
Tiempo total	17763.83	17468.58	17684	17500.08

Tabla C.18: Resultados r40806-3

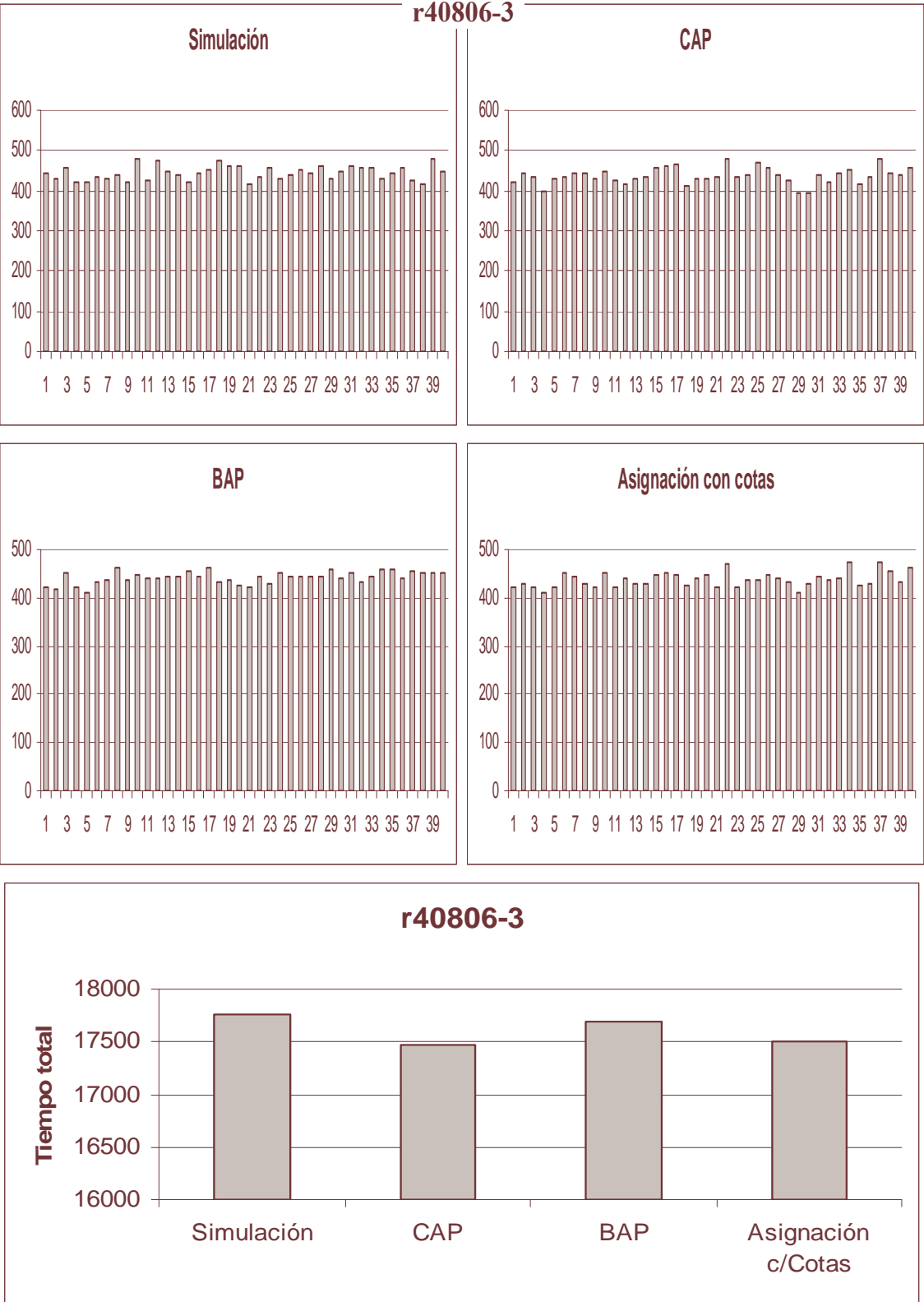


Figura C.28: r40806-3

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://spanish.direct2dell.com/archive/category/1008.aspx>.
- [2] www.gnome.org/gnumeric.
- [3] www.ilog.com/products/cplex.
- [4] B. Mc Carl. *GAMS The Solver Manuals*. 2004.
- [5] B. Mc Carl. *GAMS User Guide: 2004, Versión 21.3*. Developed in cooperation with GAMS Development Corporation, 2004.
- [6] C. Floudas. *Nonlinear and Mixed-Integer Optimization*. Oxford, N.Y., 1995.
- [7] J. Freund, I. Miller, and M. Miller. *Estadística matemática con aplicaciones*. Pearson Educación, 2000.
- [8] C. Hillermeier. *Nonlinear Multiobjective Optimization: a generalized homotopy approach*. Basel, 2001.
- [9] M. Huerta. Manufacturing multiagent system for scheduling optimization of production tasks using genetic algorithms. Master's thesis, The University of Texas at Austin, 2006.
- [10] A. Lewis and J. Borwein. *Convex Analysis and Nonlinear Optimization*. Springer, 2000.
- [11] H. Mejía. Minimización de costos totales en el problema de balanceo de línea con ciclo variable y estaciones en paralelo. Master's thesis, Universidad de Puerto Rico, 2005.

-
- [12] D. Pentico. Assignment problems: A golden anniversary survey. *European Journal of Operational Research*, 176:774–793, 2005.
- [13] G. Philip, W. Murray, and M. Wright. *Practical Optimization*. Academic Press, 1982.
- [14] M. Pinedo. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Springer Series in Operations Research, 1999.
- [15] M. Pinedo and X. Chao. *Operations Scheduling with applications in manufacturing and services*. Mc Graw-Hill, 1998.
- [16] W. Plossl. *Production and Inventory Control Principles and Techniques*. 2a. Edición.
- [17] H. Ramalhinho and D. Serra. Métodos de solución de problemas de asignación de recursos sanitarios. *Documentos de trabajo, Fundación BBVA*, 2004.
- [18] J. Walkenbach. *Microsoft Excel 2000 Power Programming with VBA*. IDG Books Worldwide, Inc., 2000.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

KARLA VIOLETA MARTÍNEZ FACUNDO

Candidata para el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis

**“ASIGNACIÓN DE TRABAJO DE ENSAMBLADO A TÉCNICOS
CON CAPACIDADES VARIADAS EN UN AMBIENTE
MULTIPRODUCTO POR LOTES”**

Nacida el 25 de septiembre de 1984 en Monterrey, Nuevo León. Hija del Sr. Eugenio Martínez Lara y la Sra. Ma. Clariza Facundo Rivas. Egresada de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas como Lic. en Matemáticas (2001-2005); relizando la tesis “Medidas de clasificación de instancias en un problema de diseño de red”, asesorada por la Dra. Ada M. Álvarez Socarrás. Inicia sus estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas en Enero de 2006 con el apoyo del PISIS y una beca económica por parte del CONACyT.