

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

META-HEURÍSTICAS HÍBRIDAS MULTI-OBJETIVO  
EN PROBLEMAS DE SECUENCIACIÓN DE OPERACIONES  
BAJO UN ENTORNO JOB-SHOP

**MARIANO FRUTOS**

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

AÑO 2010



*“Son los problemas sin resolver, no los resueltos, los que mantienen activa la mente”*

E. G. Kolbenheyer





## PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería (Tema: Meta-heurísticas híbridas multi-objetivo en problemas de secuenciación de operaciones bajo un entorno *Job-Shop*, Exp. 2910/2006) en la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Área de Organización Industrial, dependiente del Departamento de Ingeniería, durante el período comprendido entre el 26 de Septiembre de 2006 y el 05 de Agosto de 2010, bajo la dirección del Dr. Fernando Tohmé y el Mr. Ricardo N. Casal, Profesores de esta Universidad.

Quisiera agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por facilitar mi formación de posgrado a través de becas para tal propósito.

También agradezco al Director del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Dr. Carlos A. Rossit, y al personal académico y administrativo del mismo Departamento, por su ayuda y apoyo en toda instancia durante el período de desarrollo de esta tesis.

Del mismo modo, agradezco a los Directores de Tesis, Dr. Fernando Tohmé y Mr. Ricardo N. Casal, quienes guiaron el progreso de mis estudios y otros trabajos de investigación, y a la Dra. Ana C. Olivera, quien ayudo y asesoro en todos los temas referentes a programación y representación computacional.

Así mismo, quisiera agradecer a mis padres, mis hermanos y a mi novia, quienes fueron pilares claves para el desarrollo de mis estudios y mi vida en general.

PREFACIO

---

Por último, no quiero terminar sin antes agradecer el apoyo y la dedicación de todos aquellos, no mencionados anteriormente, que han colaborado para que esta tesis viese la luz.

**Mariano Frutos**

05 de Agosto de 2010

Departamento de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el .... / .... / .... , mereciendo la calificación de ..... (.....)

## RESUMEN

La planificación, programación y control de la producción se encargan de diseñar, coordinar y administrar todas las operaciones que se hallan presentes en la explotación de los sistemas productivos. En las últimas décadas muchos problemas de optimización multi-objetivo han surgido en este ámbito y fueron tratados con éxito con técnicas de resolución basadas en meta-heurísticas, en general, y con algoritmos evolutivos, en particular. Dichas técnicas, sin descartar otras, constituyen potentes herramientas para tratar adecuadamente estos problemas en el marco de las operaciones productivas y logísticas. La complejidad que se presenta en estos problemas se debe a los criterios de eficiencia que se imponen a los distintos sistemas productivos.

Este estudio se extiende al desarrollo y análisis de un procedimiento, enmarcado en la estructura particular de un algoritmo evolutivo para resolver el problema de secuenciación de trabajos (*JSSP, Job-Shop Scheduling Problem*). Además, se explora la vecindad de las distintas soluciones dentro de la misma evolución, lo que mejora significativamente los resultados. El algoritmo propuesto utiliza una codificación basada en asignación de secuencias para poder establecer permutaciones con repeticiones. Esta representación, muy sencilla y compacta, distingue a este estudio de otros. Luego de finalizar el procedimiento, se adiciona una etapa de simulación a modo de examinar las soluciones obtenidas en la etapa resolutoria. Se realiza un análisis comparativo con otros algoritmos para constatar la eficiencia del procedimiento. Finalmente, se presenta una aplicación de la técnica en varias empresas, lo que permitió contrastar los resultados obtenidos con la realidad.

## ABSTRACT

The study of planning, programming and controlling production processes yields methods of design, coordination and management of the operations involved in productive systems. In the last decades several multi-objective optimization problems have arisen in those studies and have been solved successfully with techniques based on meta-heuristics, in general, and evolutionary algorithms in particular. These techniques, notwithstanding the existence of other useful tools, provide the adequate means for treating those optimization problems in the realm of logistics and operations analysis. The complexity of the problems stems from the efficiency criteria imposed over the solution candidates.

This work extends those tools to the development and analysis of an evolutionary procedure aimed to solving the Job-Shop Scheduling Problem (*JSSP*). We explore ways of improving solutions in the vicinity of already found candidates. The algorithm generates sequences that allow permutations with repetition. This representation, simple enough, distinguishes this study from others. After running the procedure, a comparison with other algorithms is presented, based on simulations. Finally, the algorithm is applied to analyze real-world applications.

# INDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1: PLANIFICACIÓN, PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 PROCESO DE PLANIFICACIÓN, PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN	2
1.1.1 PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA O A LARGO PLAZO	3
1.1.2 PLANIFICACIÓN AGREGADA O A MEDIANO PLAZO	4
1.1.3 PROGRAMACIÓN MAESTRA	4
1.1.4 PROGRAMACIÓN DE COMPONENTES	5
1.1.5 EJECUCIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN	5
1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES PRODUCTIVAS	6
1.2.1 CONFIGURACIÓN POR PROYECTO	11
1.2.2 CONFIGURACIÓN DE TALLER ( <i>JOB-SHOP</i> )	12
1.2.3 CONFIGURACIÓN POR LOTES	12
1.2.4 CONFIGURACIÓN EN LÍNEA ACOMPASADA POR EL EQUIPO (LAE)	13
1.2.5 CONFIGURACIÓN EN LÍNEA ACOMPASADA POR OPERARIOS (LAO)	13
1.2.6 CONFIGURACIÓN DE FLUJO CONTINUO	14
1.3 ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA EL CONTROL DEL SISTEMA PRODUCTIVO	14
1.3.1 ASIGNACIÓN DE CARGA	15
1.3.2 SECUENCIACIÓN DE PEDIDOS	15
1.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO	15
<b>CAPÍTULO 2: SECUENCIACIÓN DE TRABAJOS EN CONFIGURACIONES JOB-SHOP</b>	<b>16</b>
2.2 ESTADO DEL ARTE DEL JSSP	17
2.3 PRESENTACIÓN DEL JSSP	18
2.3.1 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DEL MODELO	19

---

INDICE GENERAL

---

2.3.1.1 FECHA DE INICIO (STARTING DATE)	20
2.3.1.2 TIEMPO DE PROCESAMIENTO (TIME OF PROCESSING)	20
2.3.1.3 FECHA DE CULMINACIÓN (DATE OF CULMINATION)	21
2.3.1.4 FECHA CONSIGNADA (DUE DATE)	21
2.3.1.5 TIEMPO DE LLEGADA (LATENESS)	21
2.3.1.6 TIEMPO DE DEMORA (TARDINESS)	22
2.3.2 PRESENTACIÓN DE LOS OBJETIVOS DEL MODELO	22
2.3.2.1 INTERVALO OPERATIVO (MAKESPAN)	22
2.3.2.2 TIEMPO MEDIO DE FLUJO (MEAN FLOW TIME)	22
2.3.2.3 MÁXIMO TIEMPO DE LLEGADA (MAXIMUM INCOMING TIME)	22
2.3.2.4 MÁXIMO TIEMPO DE DEMORA (DELAY)	23
2.3.2.5 SUMA PONDERADA DE LOS TIEMPOS DE CULMINACIÓN (PONDERING)	23
2.3.3 ESPECIFICACIONES COMPLEMENTARIAS	24
2.3.3.1 FECHA DE DISPARO (RELEASE DATE)	24
2.3.3.2 TIEMPO DE CONFIGURACIÓN (SET-UP)	24
2.3.3.3 BLOQUEO (BLOCKING)	25
2.3.3.4 OPCIÓN SIN ESPERA (NO WAIT)	25
2.4 ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN DEL JSSP	25
2.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO	31
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO DE UN ALGORITMO EVOLUTIVO MULTI-OBJETIVO PARA EL JSSP</b>	<b>32</b>
3.1 JSSP MULTI-OBJETIVO	34
3.1.1 VARIABLES DE DECISIÓN	35
3.1.2 FUNCIÓN OBJETIVO	35
3.1.3 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO	35
3.1.4 OPTIMALIDAD DE PARETO	35
3.1.5 DOMINANCIA DE PARETO	35
3.1.6 CONJUNTO ÓPTIMO DE PARETO	36
3.1.7 FRONTERA DE PARETO	36
3.2 ALGORITMOS MEMÉTICOS	36

---

INDICE GENERAL

---

3.2.1 REPRESENTACIÓN DEL INDIVIDUO	38
3.2.2 PROCESO DE SELECCIÓN	40
3.2.3 OPERADOR DE CRUCE O RECOMBINACIÓN	41
3.2.4 OPERADOR DE MUTACIÓN	42
3.2.5 BÚSQUEDA LOCAL	44
3.2.5.1 RECOCIDO SIMULADO	46
3.3 DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO	49
3.4 ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD DEL ALGORITMO DESARROLLADO	50
3.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO	50
<b>CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE EXPERIMENTOS</b>	<b>52</b>
4.1 RESULTADOS ALCANZADOS	52
4.2 PROCEDIMIENTO DE COMPARACIÓN	65
4.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO	73
<b>CAPÍTULO 5: EL MÉTODO MONTE CARLO APLICADO A CONFIGURACIONES JOB-SHOP</b>	<b>74</b>
5.1 MÉTODO MONTE CARLO	75
5.2 PREPARACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	76
5.3 EXPERIENCIAS REALIZADAS	78
5.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO	86
<b>CAPÍTULO 6: APLICACIONES</b>	<b>87</b>
6.1 CASO A: PRODUCTOS DE MADERA CON TERMINACIÓN EN LACA	88
6.2 CASO B: PRODUCTOS PRE-FABRICADOS DE HORMIGÓN	95
6.3 CASO C: PRODUCTOS DE MARMOL	101
6.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO	107
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES GENERALES, ALCANCES Y FUTURAS INVESTIGACIONES</b>	<b>109</b>
7.1 CONCLUSIONES GENERALES	110
7.2 ALCANCES	111
7.3 FUTURAS INVESTIGACIONES	111

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO 1: PROBLEMÁTICA DE LA OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40</b>	<b>124</b>
<b>PUBLICACIONES</b>	<b>138</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>145</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>149</b>



## **CAPÍTULO 1:**

### **PLANIFICACIÓN, PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN**

La creciente y dinámica competitividad en los mercados, exigen a la empresa moderna la búsqueda permanente de la productividad en sus procesos, y de la calidad en los productos y servicios que ofrece (Russell y Taylor 1998). En este escenario, la gestión realizada en los sistemas productivos, como actividad relacionada con la administración de los recursos tecnológicos para la producción de bienes y servicios, constituye una herramienta de fundamental importancia, como soporte teórico y práctico en la generación de alternativas de mejoramiento de los sistemas industriales de producción, y como instrumento para el logro de una ventaja competitiva en la empresa (Meredith y Gibbs 1986). La administración, en este contexto, tiene la función de organizar, proponer y evaluar las mejores alternativas de organización y gestión para los sistemas productivos, aportando el liderazgo requerido para generar el producto y servicio que el cliente demanda. Esta requiere de equipos de especialistas en gestión de operaciones ampliamente capacitados, los cuales deben responder por la productividad general del proceso, y por la calidad y el costo competitivo del producto final. Por otro lado, las grandes empresas han desarrollado estrategias de producción orientadas al logro de ventajas competitivas de los productos y servicios que ofrecen al mercado, los cuales se caracterizan por su alto precio y calidad, y sus reducidos costos de fabricación. Para ello han debido desarrollar sistemas de fabricación basados en la aplicación de técnicas de planificación, programación y control de la producción que buscan siempre

una mayor productividad en el uso de los recursos disponibles, la generación y aplicación de procesos eficientes que permitan alcanzar siempre mayores niveles de satisfacción al cliente, y en la consideración de las diferentes normativas vigentes.

Para la administración de la producción, lo anterior implica el desarrollo de tareas interdisciplinarias y altamente especializadas al interior de la función de operaciones. Estas deben basarse en el correcto uso de técnicas y herramientas específicas del ámbito productivo, lo que contribuye significativamente a la mejora del sistema. Si bien la planificación es una problemática común a todas las empresas, no se ha resuelto de forma sistemática dado el gran número de variables que afectan a las decisiones que se deben tomar, y que hacen muy difícil la automatización de estos procesos de decisión.

## **1.1 PROCESO DE PLANIFICACIÓN, PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN**

El proceso de planificación, programación y control (*PPC, Planning, Programming and Control*) de la producción, ha sido tratado por diversos autores tales como Schroeder (1992), Tawfik y Chauvel (1992), Nahmias (1997), Buffa y Sarin (1995), entre otros. Estos establecen, en términos generales, que del mismo se desprenden los planes a largo, mediano y corto plazo de la empresa.

Otros autores como Chase y Aquilano (1995) y Adam y Ebert (1991), ofrecen modelos de gestión de la producción que a pesar de establecer un concepto integrador en el sentido vertical, no expresan claramente la integración en el sentido horizontal. Tal vez es Domínguez Machuca et al. (1995), quien presenta un mejor enfoque, ya que considera la integración en ambos sentidos. Al respecto, este autor, afirma que el proceso de *PPC* de la producción debe seguir un enfoque jerárquico, en el que se logre una integración vertical entre los objetivos estratégicos, tácticos y operativos, y además, se establezca su relación horizontal con las otras áreas funcionales de la empresa.

Básicamente, las cinco fases que componen el proceso de *PPC* de la producción son (Domínguez Machuca et al. 1995): Planificación estratégica o a largo plazo, planificación agregada o a mediano plazo, programación maestra o a corto plazo, programación de componentes, y ejecución y control de la producción (Gestión de talleres, muy corto plazo).

Es importante notar, que estas fases se deberán llevar a cabo en cualquier empresa, independientemente de su tamaño y actividad, aunque la forma como estas se desarrollen dependerá de las características propias de cada sistema productivo (Fig. 1).

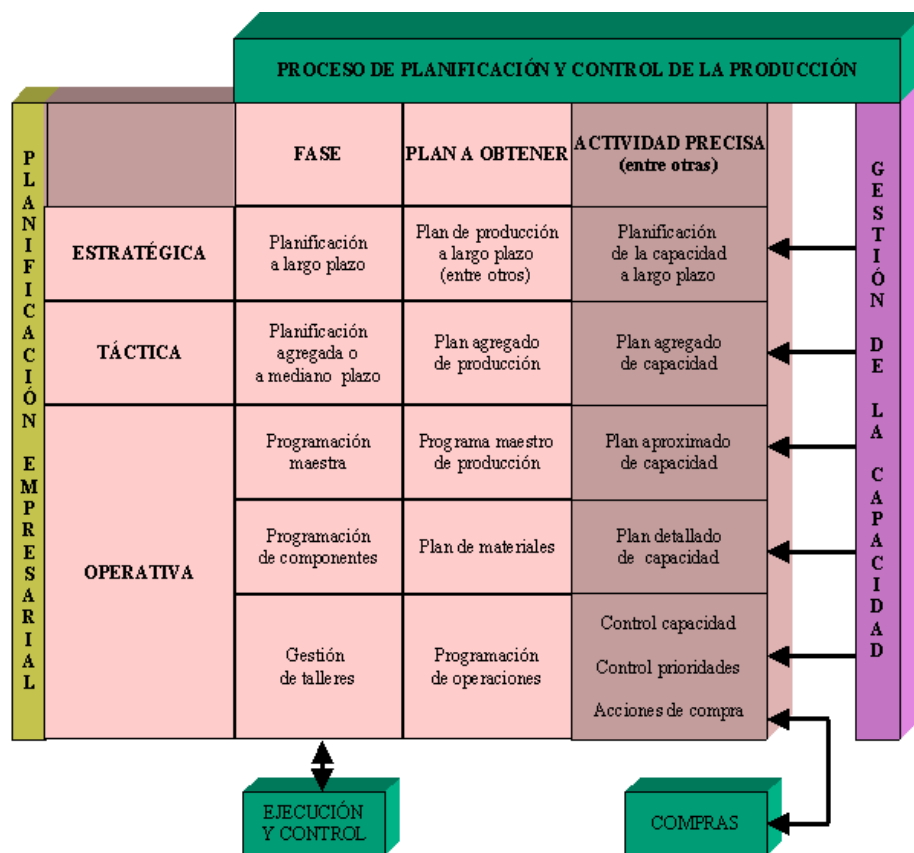


Fig. 1 Proceso de Planificación, Programación y Control de la Producción (Domínguez Machuca et al. 1995)

**1.1.1 PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA O A LARGO PLAZO:** Toda empresa establece la planificación estratégica como punto de partida para el logro de sus objetivos. El horizonte de planificación es a largo plazo, dependiendo su amplitud del tamaño de la empresa. Es decir, de este último depende la cantidad de planes y actividades que debe ejecutar cada unidad operativa, ya sea de niveles superiores o inferiores. Ha de destacarse que

el presupuesto refleja el resultado obtenido de la aplicación de los planes estratégicos. Es de considerarse que es fundamental conocer y ejecutar correctamente los objetivos para poder lograr las metas trazadas por las empresas. También es importante señalar que la empresa debe precisar con exactitud y cuidado la misión de la misma, ya que esta va a representar a todas las funciones operativas que se van a ejecutar para cumplir la meta propuesta.

**1.1.2 PLANIFICACIÓN AGREGADA O A MEDIANO PLAZO:** Teniendo en cuenta lo anterior, el siguiente paso dentro de este proceso es la planificación agregada la cual consiste en concretar el plan de producción a largo plazo. En esta etapa se establecen en unidades agregadas el valor de las principales variables productivas teniendo en cuenta además la capacidad disponible e intentando que se pueda alcanzar ese plan de producción a largo plazo al menor costo posible.

**1.1.3 PROGRAMACIÓN MAESTRA:** Una vez concluida la planificación agregada, el siguiente paso consiste en traducirlo a artículos finales específicos. Este proceso es lo que se conoce como desagregación (Domínguez Machuca et al. 1995), subdivisión (Adam y Ebert 1991) o descomposición (Narasimhan et al. 1996) del plan agregado y su resultado final se denomina programa maestro de producción (*Master Production Schedule, MPS*). Básicamente, se puede afirmar que un *MPS*, es un plan detallado que establece la cantidad específica y las fechas exactas de fabricación de los productos finales. En cuanto a su horizonte de tiempo, la mayoría de los autores coinciden en que este puede ser variable y que dependiendo del tipo de producto, del volumen de producción y del tiempo de entrega, este puede ir desde horas hasta varias semanas y meses, con revisiones, generalmente, semanales. Así mismo, Chase y Aquilano (1995), agregan que en aras de mantener el control y evitar el caos en el desarrollo del *MPS*, es importante subdividir su horizonte de tiempo en tres marcos: fijo (período durante el cual no es posible hacer modificaciones al *MPS*), medio fijo (aquel en el que se pueden hacer cambios a ciertos productos) y flexible (lapso de tiempo más

alejado, en el cual es posible hacer cualquier modificación al *MPS*). En lo referente a la materia prima y los insumos para la obtención del *MPS* es importante la consideración de los siguientes elementos (Domínguez Machuca et al. 1995): el plan agregado en unidades de producto, las previsiones de ventas a corto plazo en unidades de producto, los pedidos en firme comprometidos con los clientes y la capacidad disponible de la instalación. Dentro del proceso de formalización del *MPS*, algunas de las funciones claves que este debe cumplir son: traducir los planes agregados en artículos finales específicos, evaluar alternativas de programación, generar requerimientos de materiales, generar requerimientos de capacidad y maximizar su utilización, y facilitar el procesamiento de la información. Por último, es importante anotar que un buen *MPS* debe tomar en cuenta las limitaciones de capacidad y mantenerse factible desde este punto de vista.

**1.1.4 PROGRAMACIÓN DE COMPONENTES:** Entrando en la cuarta etapa, según lo establece Domínguez Machuca et al. (1995), se llevara a cabo la programación detallada de los componentes que integran los distintos productos y la planificación detallada de la capacidad requerida por los mismos. Deberá conseguirse que se cumpla el *MPS*, el cual si existen problemas irresolubles de disponibilidad respecto a la capacidad existente deberá ser reajustado. El resultado de este proceso, por lo que respecta a producción, es la obtención del plan de materiales.

**1.1.5 EJECUCIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN:** El último paso dentro del proceso jerárquico de planificación y control, lo constituye el programa final de operaciones, el cual le permitirá saber a cada trabajador o a cada responsable de una máquina lo que debe hacer para cumplir el plan de materiales y con él, el *MPS* de la empresa. Estas actividades, se enmarcan dentro de la fase de ejecución y control. Es importante dentro de esta fase de gestión, tomar en consideración el tipo de configuración que tiene el sistema productivo, ya que depende de esta la técnica o procedimiento a emplear en su programación y control. En consonancia con

Domínguez Machuca et al. (1995), es importante aclarar que con independencia de la técnica escogida, la programación detallada y el control de operaciones a corto plazo, deben ser diseñadas y ejecutadas en función del alcance de los objetivos planteados por cada empresa.

De los diferentes autores consultados se concluye que el enfoque jerárquico del proceso de *PPC* de la producción, presenta la perspectiva más completa en el desarrollo de las tareas que abarcan esta función, dado que permite una completa integración en el sentido vertical iniciando desde las decisiones a largo plazo en los niveles tácticos hasta llegar a los aspectos más detallados de la programación en el muy corto plazo. Así mismo, permite una integración en el sentido horizontal de tal manera que la función de producción interactúa de forma dinámica con las demás funciones de la empresa. Dentro del proceso de *PPC* que plantea dicho enfoque, las fases descritas son aplicables a cualquier tipo de empresa y son por las que debe transitar el administrador de operaciones. El desarrollo de dichas fases dependerá del tipo de empresa y de la complejidad de sus operaciones y solo a través de ellas la organización se acercará a mejores niveles de competitividad y productividad.

## **1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES PRODUCTIVAS**

Los sistemas productivos son sistemas que están estructurados a través de un conjunto de actividades y procesos relacionados necesarios para obtener productos y servicios de alto valor añadido para el cliente, con el empleo de los medios adecuados y la utilización de los métodos más eficientes. En las empresas, ya sean de manufactura o de servicio, estos sistemas representan las configuraciones productivas adoptadas en torno al proceso de conversión y transformación de *inputs* (materiales, humanos, financieros, informativos, energéticos, etc.) en *outputs* (bienes y servicios) para satisfacer distintas necesidades, requerimientos y expectativas de los clientes de la forma más racional, y a la vez, más competitiva posible.

Si se estudia el contexto general, podrá encontrarse que existen distintos sistemas productivos en las empresas, respondiendo como es lógico, a características propias de sus procesos y funcionamiento. Así mismo, si se revisa apropiadamente la literatura sobre administración de la producción y las operaciones, se encontrará con cierta diversidad de tipologías respecto a la forma de clasificar las configuraciones productivas. Esto se debe, fundamentalmente, a la variedad de enfoque con que los autores tratan estos temas en sus trabajos, que lejos de clarificar añaden mayor complejidad a dicha problemática. La gran diversidad de procesos existentes y los potenciales criterios de clasificación a considerar hacen que sea difícil encontrar una clasificación exhaustiva que de manera unívoca contemple cada caso concreto.

Woodward (1965), fue probablemente el primer autor en tipificar los sistemas productivos. Descubrió que las tecnologías de fabricación se podían encuadrar en tres grandes categorías: producción artesanal o por unidad (producción discreta no-repetitiva), producción mecanizada o masiva (producción discreta repetitiva), y la producción de proceso continuo. Cada categoría incluye un método distinto de obtener los productos. Las principales diferencias son: el grado de estandarización y automatización, el tipo de proceso, y la repetitividad de la producción. La tipología de este autor distingue entre fabricación unitaria, de pequeños lotes, de grandes lotes, la producción en serie y aquellos procesos de transformación de flujo continuo. La propuesta de Woodward (1965) ha marcado pautas en la comunidad de autores. Gousty y Kieffer (1988), sobre la base de otros criterios, como complejidad e incertidumbre, proponen una nueva tipología para los sistemas industriales, delimitando los principales componentes que configuran la problemática de los sistemas productivos.

Hopeman (1991), Companys (1986), Díaz (1993) y Schroeder (1992), entre otros, optan por diferenciar los sistemas de producción en dos grandes grupos básicos: sistemas continuos y sistemas intermitentes. Otros, como Chase et al. (2000), Ochoa y Arana (1996) y

Heizer y Render (1997), prefieren clasificarlos en: repetitivos y no-repetitivos. Los primeros se refieren a la continuidad en sí del proceso de producción, y los segundos a la repetitividad o recurrencia del producto y su proceso. Monks (1992), identifica la siguiente clasificación para los sistemas de producción: sistemas continuos, sistemas intermitentes, sistemas de trabajo interno y proyecto. Además, este autor añade que los sistemas productivos son frecuentemente clasificados según el destino de la producción, ya sean fabricantes de productos para almacén o fabricantes de productos por pedido. Otra clasificación muy común se basa en el sector de actividad. Se presentan dos tipos extremos: sistemas de manufactura, encargados de la fabricación y/o montaje de bienes materiales, y sistemas de prestación de servicios.

Por su parte Womack et al. (1991), y Doll y Vonderembse (1992), proponen otra clasificación de los sistemas productivos: producción *Craft*, producción en masa, y producción con mínimo desperdicio. Esta clasificación es adecuada para algunos propósitos, tal como explicar las diferencias entre los nuevos sistemas de producción y los tradicionales (Miltenburg 1995). También resulta útil para reflejar la evolución y los cambios de paradigmas ocurridos en fabricación desde el modelo inicial de producción artesanal, hasta el modelo más actual denominado producción ajustada.

Por su parte, Gorostegui (1991), ofrece una clasificación que difiere de las anteriores, clasificándolos según varias características propias, tales como: el destino del producto, la razón de producir, la tipificación del producto y la dimensión temporal del producto. En esta misma línea, Acevedo (1987), propone una clasificación sobre la base de una matriz morfológica que contempla la clasificación del sistema de producción de acuerdo a tres características fundamentales: relación producción/consumo (considera la respuesta que debe dar el sistema hacia el entorno, ya sea por entrega directa o contra almacén), forma en que se ejecuta la producción y elemento a optimizar. Al igual que Gorostegui (1991), se combinan características que se refieren a dimensiones externas e internas.



El problema fundamental de estas formas de clasificar el sistema de producción, radica en que aunque son útiles desde el punto de vista de la contextualización y la caracterización de las unidades de producción, no resultan muy útiles para la realización de un análisis competitivo y estratégico en fabricación, ya que, entre otras cosas, al ser demasiado amplias y genéricas, no logran identificar una cantidad finita y discreta de opciones efectivas de sistemas de producción que reflejen las distintas formas existentes de producir los productos y servicios. Además, no tratan en su proceder la interrelación estratégica del binomio producto/proceso, omitiendo así las implicaciones potenciales que representa para la empresa la elección de uno u otro sistema de producción, expresadas en términos de las diferentes dimensiones técnicas que componen un sistema productivo.

Las clasificaciones muy amplias, no facilitan la formulación de decisiones y acciones precisas y la realización de *trade-offs* entre ellas y mucho menos, permiten especificar los detalles de la estrategia de fabricación. En tal sentido, la estrategia de fabricación necesita una forma de clasificación del sistema de producción distinta, mucho más desagregada, discreta, detallada, que facilite entrar en detalles en la composición interna del sistema de producción, que permita comparar sus desempeños específicos y para este fin, la clasificación fundamentada en la tipología existente de los procesos de producción, además de ser la más usualmente empleada por investigadores, resulta la más apropiada para los propósitos de análisis competitivo y de la estrategia de fabricación.

Quizás la clasificación basada en la tipología existente de procesos de producción más difundida sea la propuesta por Hayes y Wheelwright (1984), la cual resulta similar en muchos aspectos a la establecida por Woodward (1965), pero con énfasis básico en las pautas que siguen los flujos de trabajo en la fábrica. Ellos arribaron a cinco tipos de configuraciones productivas bien definidas: proyecto, taller de trabajo (*Job-Shop*), lotes o flujo en línea desacoplado, línea de ensamblaje y proceso continuo. Asimismo, destacaron que estas

últimas cuatro varían entre dos extremos en lo que a desplazamiento de materiales se refiere, la configuración orientada hacia el producto y la configuración orientada hacia el proceso, cuya diferencia más evidente es el *lay-out* por producto, para la primera y por procesos, para la segunda.

Buffa (1968), fue sin duda otro de los primeros autores en ofrecer una tipología de sistemas de producción más acorde a lo antes referido. Partiendo de las dicotomías existentes en relación al *lay-out* de los sistemas productivos, o sea *lay-out* por producto vs. proceso, lineal vs. funcional ó continuo vs. intermitente, Buffa (1968) destaca que la mayoría de los sistemas productivos son realmente combinaciones de estos estados extremos y en tal sentido, ofrece una clasificación basada en cinco tipos de sistemas diferentes, correspondiendo los dos primeros a sistemas continuos y los restantes a sistemas intermitentes, ellos son: sistemas de distribución para productos de inventario, sistemas de producción-distribución para productos estandarizados de alto volumen, taller de trabajo cerrado para productos de inventario, taller de trabajo abierto para productos a medida y proyectos de gran envergadura. Cada uno se distingue y diferencia por sus características propias y problemáticas específicas. Los dos primeros se refieren a productos planeados para inventarios, diferenciándose en el alcance de sus operaciones y el grado de control gerencial, los tres restantes se refieren a operaciones intermitentes mayormente dedicadas a obtener productos sobre diseño, a la medida, según requerimientos de clientes. A lo anterior, Buffa (1968) añade que dichos sistemas pueden no aparecer en una forma pura, sino que comúnmente aparecen como sistemas mezclados. A esto Hill (1997), añade que aunque puedan existir sistemas híbridos orientados a reflejar mejor las necesidades de la fábrica, siempre se deberán clasificar por aquel que predomine en el proceso.

En esta misma línea, Miltenburg (1995) destaca que son dos, entre otros, los factores principales que determinan la amplitud de las similitudes y diferencias entre los sistemas de

producción existentes. Ellos son: el tipo de producto que se fabrica y los *outputs* provistos al mercado. Cada empresa fabrica un tipo de producto diferente y provee diferentes *outputs* de fabricación a sus clientes. A esto Hill (1997), añade que la coincidencia entre las dimensiones de mercado y producto con las características del proceso es un requisito esencial para evitar incompatibilidades de enfoque y ser competitivos en manufactura.

Concretando esta parte, un creciente número de autores, entre los que destacan Buffa (1984), Hayes y Wheelwright (1984), Miltenburg (1995), Hill (1993), Cribillers (1997), Domínguez et al. (1995), Hax y Majluf (1999) y Cuatrecasas (1999), han preferido utilizar, de forma general, la clasificación de sistemas de producción fundamentada en la tipología de procesos productivos. El proceso es considerado el factor de mayor relevancia al identificar o caracterizar cualquier sistema de fabricación. Esta relevancia se fundamenta en el hecho de que cada proceso se caracteriza por tener un patrón de flujo material y *lay-out* que lo hacen diferente. Asimismo, existe una indisoluble interrelación entre producto y proceso, binomio esencial para el análisis estratégico. Tal es así, que el producto y el proceso transitan por similares ciclos de vida compartidos, en los cuales el proceso adopta configuraciones específicas según sea la naturaleza del producto y la fase de su desarrollo en el mercado.

Cada sistema productivo, caracterizado esencialmente por su proceso de producción, conlleva un conjunto de implicaciones para la empresa, en cuanto al comportamiento apropiado de las diferentes dimensiones de fabricación (Hill 1997). Según este enfoque, y haciendo un análisis más detallado de los distintos trabajos y literatura consultada, se ha encontrado que los autores han aceptado por lo general, la existencia de sistemas o configuraciones productivas bien definidas (Starr 1979).

**1.2.1 CONFIGURACIÓN POR PROYECTO:** Producción generalmente de productos únicos de cierta complejidad que requieren gran cantidad de *inputs*. Estos deben fabricarse en un lugar definido debido a que es difícil o casi imposible transportarlos una vez terminados.

Como resultado, y a diferencia de cualquier otro proceso productivo, los recursos que comprende deben trasladarse al lugar de operación, ya que aquí no existe flujo del objeto de trabajo, sino que son los recursos técnicos y humanos quienes acuden al lugar de trabajo. Las actividades y recursos se gestionan como un todo. Su coordinación adquiere carácter crítico. Existe un connotado interés por el control de los costos y las fechas de terminación.

**1.2.2 CONFIGURACIÓN DE TALLER (*JOB-SHOP*):** El sistema de producción *Job-Shop* fabrica muchos productos diferentes en volúmenes que varían entre la unidad y pocas unidades de cada producto. Consiste en una fabricación no en serie, de lotes pequeños, para pedidos únicos o de pequeñas cantidades. Por lo regular implica productos adaptados, diseñados a la medida del cliente y de naturaleza muy poco repetitiva. Se requieren operaciones poco especializadas, las cuales son realizadas por un mismo obrero o por un grupo pequeño de ellos, los cuales tienen la responsabilidad de terminar todo o casi todo el producto. Como se fabrican productos muy diferentes, los recursos son flexibles y versátiles. El flujo de material es irregular y varía considerablemente de un pedido al siguiente. Se requiere que el fabricante interprete el diseño y las especificaciones del trabajo, así como que aplique capacidades del alto nivel en el proceso de conversión. En la producción *Job-Shop* lo que se trata es de obtener un producto a medida del cliente.

**1.2.3 CONFIGURACIÓN POR LOTES:** El sistema de flujo en lotes produce menos variedad de producto en volúmenes más elevados que el caso anterior. El mayor volumen se debe a un aumento de la repetitividad en ciertos artículos que se hacen dominantes. Estos productos se fabrican en lotes, que representan unos pocos meses de requerimientos de clientes. En este caso se requieren más operaciones, y éstas son más especializadas, por lo que difícilmente un mismo operario pueda dominarlas todas con una eficiencia aceptable. En tal sentido, el trabajo se divide en diferentes etapas tecnológicas, en las cuales los lotes sufren distintas operaciones. Así la instalación se suele dividir en secciones o talleres, en los cuales

se agrupan los equipos con funciones similares. Se suele emplear una combinación de *lay-outs* celulares y funcionales. Los *lay-outs* celulares se utilizan cuando es efectivo en cuanto a costos disponer el equipo en células, para producir familias de productos. Como hay muchos productos, el equipo y utillaje son mayormente flexibles, de propósito general. El flujo material es desconectado aunque regular, variable de un pedido a otro, aunque existen pautas de flujo para familias de productos y para grandes lotes.

**1.2.4 CONFIGURACIÓN EN LÍNEA ACOMPASADA POR EL EQUIPO (LAE):** El equipo y procesos están organizados en una línea o líneas especializadas para producir un pequeño número de productos diferentes o familias de productos. Estos sistemas se usan sólo cuando el diseño del producto es estable y el volumen es lo suficientemente elevado para hacer un uso eficiente de una línea especializada con capacidades dedicadas. Se fabrica a una tasa constante, con un flujo automatizado e intensivo en capital. Los operarios realizan tareas relativamente simples a un ritmo determinado por la velocidad de la línea. El control del ciclo productivo está automatizado, existe alta estandarización y una elevada eficiencia en todo el proceso.

**1.2.5 CONFIGURACIÓN EN LÍNEA ACOMPASADA POR OPERARIOS (LAO):** Se utiliza cuando el número de productos diferentes es demasiado elevado y los volúmenes de producción demasiado variables para el sistema en línea con flujo acompasado por el equipo. En este sistema, la línea es más flexible que en el caso anterior, y puede funcionar con una variedad de velocidades. La tasa de producción depende del producto particular que se fabrique, del número de operarios asignados a la línea y de la eficacia del trabajo en equipo de los operarios. Aunque los productos sean algo diferentes, son técnicamente homogéneos, usando la misma instalación, personal y la misma secuencia de estaciones de trabajo, aunque alguno de ellos pueda no pasar por alguna que no le es necesaria. El ciclo de productivo está controlado por los operarios a diferencia de la LAE donde dicho control está automatizado, esto hace que sea más flexible y versátil que el anterior.

**1.2.6 CONFIGURACIÓN DE FLUJO CONTINUO:** Este sistema es similar al de línea en flujo acompasado por el equipo. Sin embargo, es más automatizado, más intensivo en capital y menos flexible. Cada máquina y equipo están diseñados para realizar siempre la misma operación y preparados para aceptar de forma automática el trabajo suministrado por la máquina precedente. Está diseñado para fabricar un producto o una familia limitada de productos en volúmenes muy elevados. El diseño del producto es muy estable, a menudo es un producto genérico o commodity. El flujo material es continuo sincronizado, integrado a través de toda la instalación como si fuera un gran proceso tecnológico. Este rígido sistema, se basa en un proceso muy automatizado, costoso y especializado en la obtención de un producto estándar, donde la homogeneidad es total y absoluta, funcionando continuamente con mínima intervención del personal de línea. Generalmente precisa funcionar las 24 horas para procurar ser un sistema costeable y eficiente.

### **1.3 ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA EL CONTROL DEL SISTEMA PRODUCTIVO**

Los sistemas productivos, clásicos y modernos, se diferencian entre sí por el comportamiento descrito en las diversas dimensiones técnicas, propias del diseño del sistema así como de su funcionamiento, tales como, y por citar algunos ejemplos: la repetitividad de las operaciones y trabajos, el nivel de continuidad o intermitencia en el flujo material, el tipo de producción predominante, la variedad de productos con que se opera, la estructura espacial utilizada, la estructura temporal de la producción, la propia naturaleza del producto que se fabrica y comercializa, el nivel de especialización de las capacidades, el nivel de estandarización de los productos, el grado de automatización incorporado, así como las dimensiones de competencia que se proveen al cliente final, entre otras. En términos generales y en el caso más complejo, las dos actividades más importantes que se presentan en cualquier sistema productivo según

los autores Adam y Ebert (1991), Schroeder (1992) y Domínguez Machuca et al. (1995) son la asignación de cargas y la secuenciación de trabajos.

**1.3.1 ASIGNACIÓN DE CARGA:** En aproximación a los conceptos de Adam y Ebert (1991), Schroeder (1992) y Domínguez Machuca et al. (1995), esta se define como la asignación de trabajos a cada máquina o centro de trabajo. Esto permite controlar la capacidad y la asignación de las actividades específicas en cada máquina o centro de trabajo.

**1.3.2 SECUENCIACIÓN DE TRABAJOS:** Esta actividad consiste, en la determinación del orden en que serán procesados los trabajos en cada máquina o centro de trabajo, una vez establecida la existencia de capacidad. El problema de la secuenciación se hace más complejo en la medida que aumenta el número de trabajos a realizar. Así mismo, es importante tomar en cuenta el tipo de configuración del taller, ya que de esto depende la aplicabilidad de las diferentes técnicas. Existen métodos eficientes para casos particulares que se presentan en este tipo de configuración (algoritmo húngaro, algoritmo de Kauffman, algoritmo de Campbell-Dudek-Schmith, algoritmo de Bera (1996), técnicas de simulación, entre otros. Para el caso generalizado, debido a la diversidad en la secuencia de trabajos, no es posible emplear una técnica específica, por lo cual la secuencia se establece en función de los objetivos específicos de cada programador (Kalenatic y Blanco 1993).

#### **1.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO**

En este capítulo se presentaron las principales etapas que involucra el proceso de planificación, programación y control de la producción. Además, se introdujo una clasificación de las principales configuraciones productivas existentes en la actualidad. En esta introducción a la temática no se ha pretendido abordar todos los tipos de configuraciones que adquieren los distintos sistemas productivos, sino ofrecer una amplia terminológica sobre el tema y un marco conceptual que constituya un punto de partida del presente estudio.

## **CAPÍTULO 2:**

### **SECUENCIACIÓN DE TRABAJOS EN CONFIGURACIONES *JOB-SHOP***

La secuenciación de trabajos se considera el último paso dentro del nivel táctico en el proceso de *PPC* de la producción, y tiene el fin de transformar los programas de mayor jerarquía en trabajos específicos en la planta física de producción. Consiste en tomar decisiones para organizar la producción considerando la disponibilidad de recursos y restricciones que los mismos presentan. Decisiones eficientes, dentro del ámbito productivo, permiten mejorar la rentabilidad y competitividad de la empresa. El problema de secuenciación de trabajos en entornos productivos tipo *Job-Shop* (*JSSP*, *Job-Shop Scheduling Problem*), es uno de los que más aplicación ofrece. La resolución del mismo permite incrementar la eficiencia de los distintos procesos de manufactura.

La complejidad y la estructura del *JSSP* son similares a la de otras ramas de optimización combinatoria (Anexo 1). Este problema se presenta con mucha frecuencia en la optimización de procesos de producción industrial. Muchos autores han intentado una sistematización del cuerpo del problema y algoritmos que giran en torno a él. Todavía, para este tipo de problema, a diferencia de otros dentro del área de la optimización combinatoria, no es posible indicar un enfoque netamente preferible por sobre los demás. Este problema es uno de los que ha generado el mayor número de estudios. Se han dado diversas propuestas de como plantear el problema (Cheng y Smith 1997, Sadeh y Fox 1995), para posteriormente



darle solución a través de una variedad de algoritmos como, por ejemplo, *Clonal Selection* (Cortés Rivera et al. 2003), *Taboo Search* (Armentano y Scrich 2000), *Ant Colony Optimization* (Merkle y Middendorf 2001), *Branch-and-bound methods* (Perregaard 1995), *Genetic Algorithms* (Zalzala y Flemming 1997), Reglas de prioridad (Panwalker y Iskander 1977), *Shifting Bottleneck* (Adams et al. 1988), etc. El *JSSP* se define como la asignación de recursos limitados a trabajos que se procesan a lo largo del tiempo y tiene como finalidad la optimización de uno o más objetivos (Pinedo 1995, Storer et al. 1992, Applegate y Cook 1991), los cuales serán descritos posteriormente. Este es un problema muy difícil de resolver, lo que hace que se encuentre en la categoría *NP-Hard* (Papadimitriou 1994, Ullman 1975).

Aunque la literatura existente en torno al *JSSP* es abundante, la mayoría de estos trabajos han considerado solamente un objetivo, pero la práctica demuestra que no es así, lo que concuerda con lo planteado por T'kindt y Billaut (2006). Estos autores manifiestan que un problema genuino de *scheduling*, en esencia, involucra múltiples objetivos.

## **2.2 ESTADO DEL ARTE DEL *JSSP***

La investigación en teoría de *scheduling* ha venido desarrollándose en los últimos 40 años y ha sido objeto de mucha literatura con técnicas que van desde reglas de prioridad no refinadas, hasta algoritmos paralelos de ramificación y poda altamente sofisticados, y heurísticas basadas en *Shifting Bottleneck*, entre otras (Larrazábal 2003, Armentano y Scrich 2000, Mollaghasemi et al. 1998). Además, dichas técnicas han sido formuladas desde un amplio espectro de investigadores, desde científicos de gestión, hasta expertos en producción. No obstante, con la aparición de nuevas metodologías, como redes neuronales y computación evolutiva, investigadores de campos como la biología, genética y neurofisiología han tenido también contribuciones regulares a la teoría de *scheduling*, poniendo de manifiesto la naturaleza multi-disciplinar de este campo.

Diversas opiniones existen con respecto al origen del *JSSP*. Roy y Sussman (1964) fueron los primeros en proponer la representación mediante el grafo disyuntivo y Egon Balas (1969) fue el primero en aplicar un acercamiento enumerativo basado en este grafo. Sin embargo, existen trabajos anteriores: Akers y Friedman (1955), aplicaron un modelo de *álgebra booleana* para representar secuencias de procesamiento, Jackson (1956) generalizó el algoritmo del *flow-shop* de Johnson (1954) al algoritmo del *job-shop*, y Giffler y Thompson propusieron un algoritmo de reglas de prioridad (1960). Aunque no está claro quién debería llevarse el crédito por haber propuesto por primera vez el *JSSP*, se acepta que el libro "*Industrial Scheduling*" editado por Muth y Thompson (1964), constituye la base para la mayoría de las investigaciones que siguieron.

Hasta finales de los 80's, la mayoría de los trabajos existentes consideraban un solo objetivo, mientras que en la práctica, este aspecto es multi-dimensional, y para medir la efectividad de esta actividad a nivel de empresa, se conjugan múltiples elementos, tales como los inventarios de trabajo en proceso, la utilización de los equipos y el cumplimiento con las fechas de entrega ofrecidas a los clientes. Esto ha obligado el desarrollo del *JSSP* multi-objetivo (Hoogeveen 2005). Si bien es cierto que este tema es relativamente nuevo en la literatura correspondiente al *JSSP*, es claro que los últimos desarrollos al respecto se ven obligados a incluirlo, más cuando se aprecia que esto hace más realista la situación y permite una consideración más práctica de la problemática.

### **2.3 PRESENTACIÓN DEL *JSSP***

Se dispone de un conjunto de máquinas que pueden realizar diversos trabajos y se quiere elaborar cierto producto a partir de una determinada materia prima. Para esto, se sigue una serie de pasos, donde cada uno consiste en aplicar una máquina determinada durante un período de tiempo ininterrumpido (Crawford y Baker 1994, Smith y Cheng 1993). Se llama operación a cada uno de esos pasos y trabajo a la secuencia de operaciones necesarias para

terminar el producto. La secuencia de operaciones esta sujeta a determinadas relaciones de precedencia. Si se quiere obtener varios productos distintos, se tiene asociado un trabajo con sus correspondientes operaciones a cada uno de esos productos. Dado un conjunto de máquinas y un conjunto de trabajos, una programación (*scheduling*) es una asignación que fija a cada operación un intervalo de tiempo para ser efectuada. El problema consiste en encontrar un programa específico que minimice el tiempo necesario para completar todas las operaciones.

### 2.3.1 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DEL MODELO

Entrando en un lenguaje más específico, a modo de poder modelar e identificar las variables del problema, se enuncia el concepto del tema en estudio en este contexto. El *JSSP* consiste en organizar la ejecución de  $n$  trabajos a ser realizados en  $m$  máquinas. Es decir, se tiene un conjunto finito de trabajos  $J = \{J_j\}_{j=1}^n$ . Estos trabajos deben ser procesados por un conjunto finito de máquinas  $M = \{M_k\}_{k=1}^m$ . Al procesamiento de una operación de un trabajo  $J_j$  en una máquina  $M_k$  se la denomina  $O_{ij}^k$ , donde  $i$  indica el orden en que deben ser realizadas el conjunto de operaciones  $S_j$  de un mismo trabajo  $J_j$ . La asignación de la operación  $O_{ij}^k$  a la máquina  $M_k$  ya esta definida en el problema, por lo que se origina un conjunto finito de agrupaciones  $E = \{E_k\}_{k=1}^m$  de operaciones  $O_{ij}^k$  que se realizan en una misma máquina  $M_k$ .

Como información de entrada se proporciona la secuencia de máquinas por las que cada trabajo debe pasar y el tiempo de procesamiento de cada operación  $\tau_{ij}^k$  (Adams et al. 1998) (Tabla 1, ejemplo).

Como se menciono anteriormente,  $n$  trabajos son procesadas por  $m$  máquinas, por lo tanto existen  $(n!)^m$  soluciones factibles para el *JSSP* (Tabla 2). El tamaño del espacio de búsqueda corresponde a este valor, y representa el número total de evaluaciones que deben ser realizadas a modo de evaluar todas las soluciones posibles.

**Tabla 1** Datos iniciales del *Job-Shop Scheduling Problem* (Ejemplo)

<b>Problema 3×3 con 9 operaciones</b>				
$J_j$	$O_{ij}^k$	$\tau_{ij}^k$	$M_k$	$N^\circ$
$J_1$	$O_{11}^1$	3	$M_1$	1
	$O_{21}^2$	3	$M_2$	2
	$O_{31}^3$	3	$M_3$	3
$J_2$	$O_{12}^1$	2	$M_1$	4
	$O_{22}^3$	3	$M_3$	5
	$O_{32}^2$	4	$M_2$	6
$J_3$	$O_{13}^2$	3	$M_2$	7
	$O_{23}^1$	2	$M_1$	8
	$O_{33}^3$	1	$M_3$	9

Se supone que al inicio del proceso cada máquina está disponible y que en cada momento solo puede procesar una operación a la vez. Además, ningún trabajo puede ser procesado más de una vez en la misma máquina, dos operaciones del mismo trabajo no se pueden procesar simultáneamente, los trabajos tienen que esperar a que la siguiente máquina esté disponible para que este sea procesado, las operaciones no se pueden interrumpir, ninguna operación tiene prioridad sobre las demás, los tiempos de configuración y cambio de máquina están incluidos en los tiempos de procesamiento, y las máquinas pueden estar ociosas en cualquier momento del plan de trabajo. El estado final que se desea alcanzar consiste en que todos los trabajos hayan finalizado el procesamiento de su última operación (Heinonen y Pettersson 2007). Cabe destacar que cada trabajo debe visitar todas las máquinas antes de completarse. Se introducen de forma preliminar algunos conceptos.

**2.3.1.1 FECHA DE INICIO (*STARTING DATE*)**  $t_{ij}^k$ : Corresponde al instante de tiempo en que la operación  $O_{ij}^k$  comienza su procesamiento en la máquina  $M_k$ . En algunas ocasiones, la  $t_{ij}^k$  puede intervenir como una restricción del modelo. Es decir, puede estar sujeta a algún acontecimiento operativo.

**2.3.1.2 TIEMPO DE PROCESAMIENTO (*TIME OF PROCESSING*)**  $\tau_{ij}^k$ : Como fue

mencionado anteriormente, es el tiempo que requiere la operación  $O_{ij}^k$  el uso de una máquina  $M_k$ . Durante este tiempo no se permite la interrupción del proceso.

**Tabla 2** Espacio de soluciones factibles del *Job-Shop Scheduling Problem* (Ejemplo)

Trabajos (n)	Máquinas (m)	$n!^m$	Tiempo unitario (seg.)	Tiempo (seg.)
3	3	216	$1 * 10^{-10}$	0,00216
3	5	7776	$1 * 10^{-10}$	0,07776
5	5	$2,48 * 10^{10}$	$1 * 10^{-10}$	248.832
5	10	$6,19 * 10^{20}$	$1 * 10^{-10}$	$6,19 * 10^{15}$
10	5	$6,29 * 10^{32}$	$1 * 10^{-10}$	$6,29 * 10^{27}$
10	10	$3,95 * 10^{65}$	$1 * 10^{-10}$	$3,95 * 10^{60}$
10	15	$2,49 * 10^{98}$	$1 * 10^{-10}$	$2,49 * 10^{93}$
15	5	$3,82 * 10^{60}$	$1 * 10^{-10}$	$3,82 * 10^{55}$
15	10	$1,46 * 10^{121}$	$1 * 10^{-10}$	$1,46 * 10^{116}$
15	15	$5,59 * 10^{181}$	$1 * 10^{-10}$	$5,59 * 10^{176}$
15	20	$2,14 * 10^{242}$	$1 * 10^{-10}$	$2,13 * 10^{237}$
20	5	$8,52 * 10^{91}$	$1 * 10^{-10}$	$8,52 * 10^{86}$
20	10	$7,27 * 10^{138}$	$1 * 10^{-10}$	$7,26 * 10^{178}$
20	15	$6,19 * 10^{275}$	$1 * 10^{-10}$	$6,19 * 10^{270}$

**2.3.1.3 FECHA DE CULMINACIÓN (DATE OF CULMINATION)  $C_j$ :** Es el instante de tiempo en el cual la última operación  $O_{ij}^k$  del trabajo  $j$  termina. Se debe tener en cuenta que cada trabajo  $j$  se completa con  $m$  operaciones, es decir en la última operación  $i = m$ . Si no admitimos interrupciones,  $C_j$  está dado por la suma de la fecha de inicio de la última operación del trabajo  $j$  y del tiempo de procesamiento de dicha operación (exp. 1).

$$C_j = t_{mj}^k + \tau_{mj}^k \quad (1)$$

**2.3.1.4 FECHA CONSIGNADA (DUE DATE)  $d_j$ :** Indica el instante de tiempo, a partir de un instante inicial 0, antes del cual el trabajo  $j$  debería estar terminado. En general, la violación de un tiempo de consignación conlleva algún costo.

**2.3.1.5 TIEMPO DE LLEGADA (LATENESS)  $L_j$ :** Es la diferencia entre el tiempo de

culminación ( $C_j$ ) y la fecha consignada ( $d_j$ ) para la entrega del trabajo  $j$  (exp. 2). Se observa que si es positiva indica un retraso y si es negativa un adelanto.

$$L_j = C_j - d_j \quad (2)$$

**2.3.1.6 TIEMPO DE DEMORA (*TARDINESS*)**  $T_j$ : Coincide con el tiempo de llegada  $L_j$  cuando éste es positivo, de otra manera vale 0 (exp. 3).

$$T_j = \text{máx} (L_j, 0) \quad (3)$$

### 2.3.2 PRESENTACIÓN DE LOS OBJETIVOS DEL MODELO

La variabilidad de los problemas de *scheduling* se manifiesta principalmente en la definición de los objetivos del mismo, los cuales pueden ser muy distintos. Luego de haber introducido las variables del modelo, se esta en condiciones de presentar los diferentes objetivos que involucra este problema. A continuación se describen los mismos.

**2.3.2.1 INTERVALO OPERATIVO (*MAKESPAN*)**  $C_{\text{máx}}$ : Dado un programa, es el período o lapso que abarca la totalidad de la producción, es decir, la realización de todos los trabajo (exp. 4).

$$C_{\text{máx}} = \text{máx} (C_j) \quad (4)$$

**2.3.2.2 TIEMPO MEDIO DE FLUJO (*MEAN FLOW TIME*)**  $\bar{F}$ : Corresponde al tiempo medio en completar los trabajos. Se tiene en cuenta la fecha de inicio y la fecha de culminación de los mismos (exp. 5). La minimización de este objetivo permite disminuir el número de trabajos en proceso.

$$\bar{F} = \sum_{j=1}^n (t_{mj}^h + \tau_{mj}^h - t_{1j}^k) / n \quad (5)$$

**2.3.2.3 MÁXIMO TIEMPO DE LLEGADA (*MAXIMUM INCOMING TIME*)**  $L_{\text{máx}}$ : Es el tiempo de retardo del trabajo que termina con mayor retraso respecto a su propia fecha

consignada (exp. 6). Se observa que puede ser negativo y en tal caso representa el anticipo del trabajo que termina con menor antelación.

$$L_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x (L_j) \quad (6)$$

**2.3.2.4 MÁXIMO TIEMPO DE DEMORA (*DELAY*)  $T_{m\acute{a}x}$**  : es el tiempo de retardo del trabajo que termina con mayor retraso respecto a su propia fecha consignada. Coincide con el máximo tiempo de llegada  $L_{m\acute{a}x}$  cuando éste es positivo (exp. 7).

$$T_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x (T_j) \quad (7)$$

**2.3.2.5 SUMA PONDERADA DE LOS TIEMPOS DE CULMINACIÓN (*PONDERING*)**

$C_{\Sigma}$  : Esta suma ponderada introduce la noción de prioridad (exp. 8). En el caso en el cual los pesos  $w_j$  sean iguales, esta cantidad aparece como una medida del volumen total de tiempo que el sistema asigna a cada trabajo, lo que puede indicar el servicio que ofrece el sistema.

$$C_{\Sigma} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j C_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (8)$$

Una vez definidos los objetivos correspondientes al problema en estudio, se presentan las restricciones del modelo. Inicialmente, se establece que la fecha de inicio de todas las operaciones debe ser mayor o igual al instante de la programación, por lo que se expresa que debe ser mayor o igual a 0 (exp. 9).

$$t_{ij}^k \geq 0 \quad (9)$$

Seguido a esto, se señala que en este modelo sobresalen dos conjuntos de restricciones a considerar por su importancia, de las cuales uno de los conjuntos es utilizado para implementar las restricciones disyuntivas. El primer grupo tiene que ver con las restricciones de precedencia, donde se indica que operación se inicia antes que otra, y el segundo grupo de restricciones tiene que ver con las restricciones de *no traslape* (disyuntivas) y cuyo propósito

es garantizar que una máquina no procesará dos operaciones a la vez. Primero se va a considerar la restricción de precedencia de operaciones para un trabajo dado. Para un trabajo  $J_j$ , si el procesamiento de la operación  $O_{ij}^k$  en la máquina  $M_k$  precede a la operación  $O_{sj}^h$  en la máquina  $M_h$ , entonces la diferencia entre las fechas de inicio de ambas operaciones debe ser superior al tiempo de procesamiento de  $O_{ij}^k$ , es decir, mayor o igual a  $\tau_{ij}^k$  (exp. 10).

$$t_{sj}^h - t_{ij}^k \geq \tau_{ij}^k \quad (10)$$

Ahora se considera la restricción de *no traslape* de operaciones para una máquina dada. Para dos operaciones,  $O_{ij}^k$  y  $O_{sp}^k$ , donde ambas necesitan ser procesados en la máquina  $M_k$ , si la operación  $O_{ij}^k$  se procesa primero que la operación  $O_{sp}^k$ , entonces la diferencia entre las fechas de inicio de ambas operaciones debe ser superior al tiempo de procesamiento de  $O_{ij}^k$ , es decir, mayor o igual a  $\tau_{ij}^k$  (exp. 11).

$$t_{sp}^k - t_{ij}^k \geq \tau_{ij}^k \quad (11)$$

### 2.3.3 ESPECIFICACIONES COMPLEMENTARIAS

En cuanto a este problema de programación, suelen aparecer diversos tipos de especificaciones complementarias que contribuyen a definir y complicar el problema. Estas especificaciones pueden ser:

**2.3.3.1 FECHA DE DISPARO (*RELEASE DATE*):** Indica el instante de tiempo, a partir de un instante inicial, antes del cual no es posible iniciar la ejecución del trabajo  $j$ . Por ejemplo, si la materia prima necesaria para efectuar el trabajo  $j$  arriba dentro de un lapso de tiempo determinado, el trabajo  $j$  no puede comenzarse hasta entonces.

**2.3.3.2 TIEMPO DE CONFIGURACIÓN (*SET-UP*):** Esta característica está presente en diversas ocasiones en el *JSSP*, e indica que se quiere seguir al trabajo  $i$  el trabajo  $j$ , entonces, entre estos dos trabajos, es necesario reconfigurar la máquina, lo cual requiere un tiempo  $\kappa_{ij}$ .



**2.3.3.3 BLOQUEO (*BLOCKING*):** En un *JSSP*, los trabajos en espera para ser efectuados en una máquina, son alojados en un buffer. Si en un instante dado el buffer está lleno y un trabajo concluido en otra máquina no puede encontrar un puesto en él, está por lo tanto condenada a permanecer bloqueando la máquina, la cual no podrá iniciar un nuevo trabajo hasta tanto no se desocupe.

**2.3.3.4 OPCIÓN SIN ESPERA (*NO WAIT*):** más restrictiva que la anterior opción es la situación *no-wait* en la cual a los trabajos no se les permite ni siquiera esperar dentro de una máquina, y en cambio, debe garantizarse que al instante de completar una operación en una máquina, la máquina sucesiva está ya disponible para continuar el trabajo.

## 2.4 ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN DEL *JSSP*

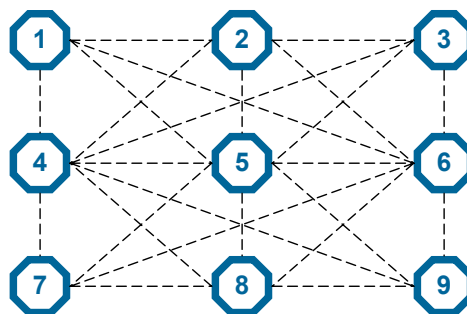
A modo de poder estudiar y representar este problema, se utilizará el grafo como herramienta de análisis. Este es un recurso muy difundido en la órbita de la optimización combinatoria. Se recuerda que un grafo es un par de la forma  $G = (\varepsilon, \omega)$ , donde  $\varepsilon$  es el conjunto de nodos o vértices del grafo y  $\omega$  el conjunto de arcos o ramas. Además, cada arco tiene asociada una dirección, por lo que el grafo se dirá dirigido. En este contexto, los nodos representarán las operaciones y los arcos precedencias temporales entre operaciones, de manera que, si una operación  $i$  precede a una  $j$  de acuerdo con un programa determinado, entonces el arco  $(i, j)$  debe incluirse en el conjunto  $\omega$ . Se procede a continuación a ampliar esta idea. En primer lugar, se advierte un orden entre elementos de  $\varepsilon$ , el orden prescrito por cada trabajo para procesar las operaciones que lo conforman. Entonces incorporamos un arco  $(i, j)$  al conjunto  $\omega$  por cada par de operaciones de un trabajo en las que  $i$  preceda a  $j$  de acuerdo al orden dado por ese trabajo. En segundo lugar, en cada máquina existe un orden para efectuar las operaciones que allí se realizan, en efecto, esto es debido a la imposibilidad de una máquina para ejecutar operaciones simultáneamente. Es decir, existe un orden entre operaciones que

pertenecen a la misma máquina. Se puede pensar en representar este orden mediante secuencias de operaciones. Si se llama  $\pi_k$  a la secuencia de operaciones en la máquina  $M_k$ , se dirá que  $\pi$  es simplemente un conjunto de secuencias  $\pi = \{\pi_k\}_{k=1}^m$ , donde  $m$  es el número de máquinas del problema. Naturalmente, se tiene una representación de esas restricciones en términos del grafo. Por último, se introducen dos nuevas operaciones  $s$  y  $t$ . Estas, respectivamente, son operaciones ficticias que se realizan antes ( $s$ ) y luego ( $t$ ) que todas las demás. Entonces, la producción comienza con la operación  $s$  y finaliza con la operación  $t$ . Se considera que no pertenecen a ningún trabajo y que tienen un tiempo de procesamiento asociado nulo. De ahora en más, el conjunto  $\varepsilon$  contendrá estas dos operaciones. Entonces, dado un conjunto de secuencias  $\pi$  se puede representar las precedencias temporales del problema mediante un grafo que contenga todas las operaciones y todos los arcos mencionados anteriormente. Antes de seguir con el análisis, se hacen algunas observaciones. Primero, el conjunto de secuencias  $\pi$ , como se verá más adelante, determina el programa y viceversa, lo cual nos motiva a considerar como variable del problema a este conjunto en vez del programa. Esto tiene la ventaja de explotar el vínculo directo entre  $\pi$  y el grafo. Segundo, se advierte que  $\pi$  puede ser elegido entre muchas posibilidades, sin embargo, no todas representan un esquema factible. Si el conjunto de secuencias  $\pi$  induce un ciclo en  $G$  entonces los arcos no reflejan una relación de precedencia temporal. Por lo tanto, se dirá que  $\pi$  es una solución factible del problema si  $G$  es acíclico. Dado un programa o su solución factible asociada, existe un lapso mínimo de tiempo en el cual se puede completar toda la producción, el cual habíamos llamado *makespan*. Si se considera el grafo  $G$  definido como antes y si se toma como peso de cada arco  $(i,j)$  el tiempo que demora en efectuarse la operación  $j$ , entonces el *makespan* es igual a la longitud del camino más largo entre  $s$  y  $t$ , denominado camino crítico (*critical path*). Se ha de subrayar este hecho, ya que, como existen numerosos algoritmos que en tiempo polinomial encuentran el camino crítico en un grafo, se dispone de un procedimiento

para encontrar el *makespan* asociado a un conjunto de secuencias  $\pi$  factible. Finalmente, el problema queda reducido a encontrar un  $\pi$  factible que minimice el *makespan*.

En este apartado se intenta ofrecer un método para calcular el *makespan* asociado a un  $\pi$ . Para esto, se debe tener en cuenta la equivalencia entre dicho valor y el camino más largo entre los vértices  $s$  y  $t$  que demarcan los límites de la producción. Ahora, se va a definir el algoritmo de Ford y Fulkerson (1962) para encontrar el camino crítico entre los vértices  $s$  y  $t$  de un grafo dirigido  $G$  para el *JSSP* que se tomo como ejemplo en la Tabla 1. Inicialmente se define el conjunto  $\varepsilon$ . Para ello se toman como nodos las operaciones las cuales se identifican con números enteros. La referencia se observa en la quinta columna de la Tabla 1 (Fig. 1).

Seguido a esto, se ve el conjunto  $\omega$  de arcos. El primer trabajo ( $J_1$ ) está constituido por las operaciones 1, 2 y 3, y deben efectuarse en ese orden y no en otro, por lo tanto el conjunto  $\omega$  debe contener los arcos (1,2), (1,3) y (2,3). En efecto, como la operación 1 se realiza antes que la operación 2, debe estar presente en  $\omega$  el arco (1,2), como la operación 1 se realiza antes que la operación 3, el conjunto debe contener el arco (1,3), y, finalmente, como la operación 2 se realiza antes que la operación 3, el conjunto debe contener el arco (2,3).



**Fig. 2** Esquema de representación del conjunto de nodos

Procediendo análogamente, el segundo trabajo ( $J_2$ ) aporta los arcos (4,5), (4,6) y (5,6). Si ahora se procede con el tercer trabajo ( $J_3$ ), se agregan los arcos (7,8), (7,9) y (8,9). Por lo tanto, los arcos (1,2), (1,3), (2,3), (4,5), (4,6), (5,6), (7,8), (7,9) y (8,9) (Fig. 3), deberán ser incluidos en  $\omega$ .

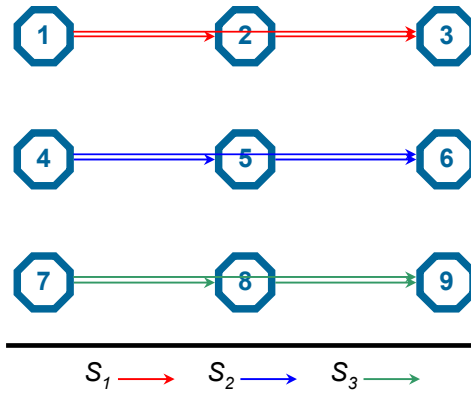


Fig. 3 Las flechas continúas muestran elementos del conjunto  $\omega$

Ahora se considera la primera máquina ( $M_1$ ). Allí se realizan tres operaciones 1, 4 y 8, las cuales conforman el grupo  $E_1$ . Dado que una máquina no puede realizar tareas simultáneas, es preciso secuenciarlas, esto es, decidir el orden en que serán procesadas. Por ejemplo, la secuencia  $\pi_1$  podría ser 1, 4 y 8, y entonces el conjunto  $\omega$  deberá contener los arcos asociados a la máquina  $M_1$  (1,4), (1,8) y (4,8), o bien podría ser 1, 8 y 4, y en consecuencia (1,8), (1,4) y (8,4). Si se considera la segunda máquina ( $M_2$ ), allí se realizan las operaciones 2, 6 y 7, las cuales conforman el grupo  $E_2$ .

Para la máquina  $M_2$  la secuencia  $\pi_2$  podría ser 2, 6 y 7, y entonces el conjunto  $\omega$  deberá contener los arcos asociados a esta máquina (2,6), (2,7) y (6,7). Por último, si se considera la tercer máquina ( $M_3$ ), allí se realizan las operaciones 3, 5 y 9, las cuales conforman el grupo  $E_3$ .

Para la máquina  $M_3$  la secuencia  $\pi_3$  podría ser 3, 5 y 9, y entonces el conjunto  $\omega$  deberá contener los arcos asociados a esta máquina (3,5), (3,9) y (5,9). Por lo tanto, los arcos (1,4), (1,8), (4,8), (2,6), (2,7), (6,7), (3,5), (3,9) y (5,9) (Fig. 4), deberán ser incluidos en el conjunto  $\omega$ .

Por último, si se adicionan los nodos  $s$  y  $t$ , el conjunto  $\omega$  deberá contener los arcos de la forma  $(s,i)$  y  $(i,t) \forall i=1,\dots,9$ , es decir,  $(s,1)$ ,  $(s,2)$ ,  $(s,3)$ ,  $(s,4)$ ,  $(s,5)$ ,  $(s,6)$ ,  $(s,7)$ ,  $(s,8)$ ,  $(s,9)$ ,  $(1,t)$ ,  $(2,t)$ ,  $(3,t)$ ,  $(4,t)$ ,  $(5,t)$ ,  $(6,t)$ ,  $(7,t)$ ,  $(8,t)$  y  $(9,t)$  (Fig. 5).

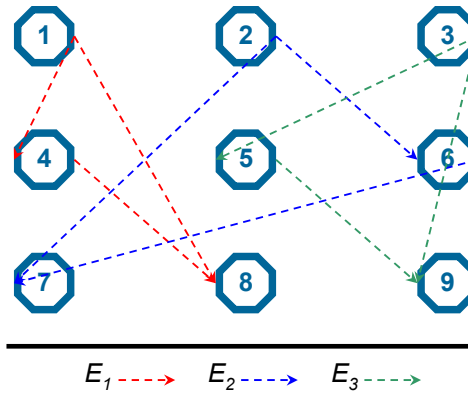


Fig. 4 Las flechas punteadas muestran elementos del conjunto  $\omega$

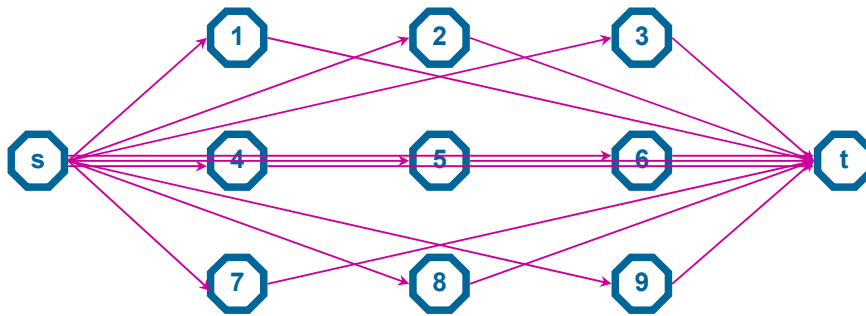


Fig. 5 Las flechas continuas muestran elementos del conjunto  $\omega$  que involucran a los nodos  $s$  y  $t$

Finalmente, queda conformado el conjunto  $\omega$  de la manera  $\omega = \{(1,2), (1,3), (2,3), (4,5), (4,6), (5,6), (7,8), (7,9), (8,9), (1,4), (1,8), (4,8), (2,6), (2,7), (6,7), (3,5), (3,9), (5,9), (s,1), (s,2), (s,3), (s,4), (s,5), (s,6), (s,7), (s,8), (s,9), (1,t), (2,t), (3,t), (4,t), (5,t), (6,t), (7,t), (8,t), (9,t)\}$  (Fig. 6).

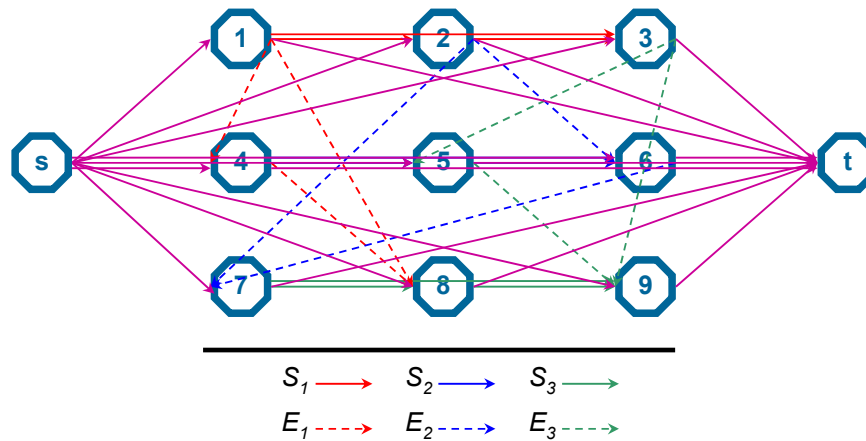


Fig. 6 Las flechas muestran el conjunto completo  $\omega$

Se observa que en el conjunto de arcos  $\omega$  del grafo  $G$  se pide que no se formen ciclos.

Si no se hiciera, se podría elegir el orden 6, 2 en la segunda máquina ( $M_2$ ) y habría un ciclo formado por los arcos (2,3), (3,5), (5,6) y (6,2) de  $\omega$ . Esto no se debe permitir, ya que conduce al absurdo de suponer que la operación 2 se hace antes que sí misma (Fig. 7).

Ahora, asignando al arco  $(i,j)$  un peso igual al tiempo que demora en efectuarse la operación  $j$ , buscamos el camino más largo dentro del grafo resultante.

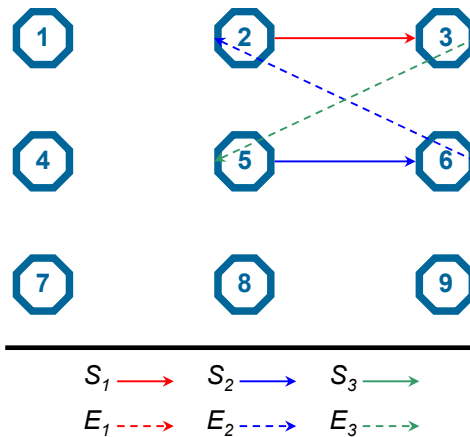


Fig. 7 Error en la selección, ciclo formado por los arcos (2,3), (3,5), (5,6) y (6,2) (se omitieron los nodos  $s$  y  $t$ )

En este caso es el camino que recorre los vértices  $s$ , 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 y  $t$  con un peso total de 22, lo cual indica que completar la producción con el conjunto de secuencias  $\pi$  dado en el conjunto  $\omega$ , tardará 22 unidades de tiempo (Fig. 8).

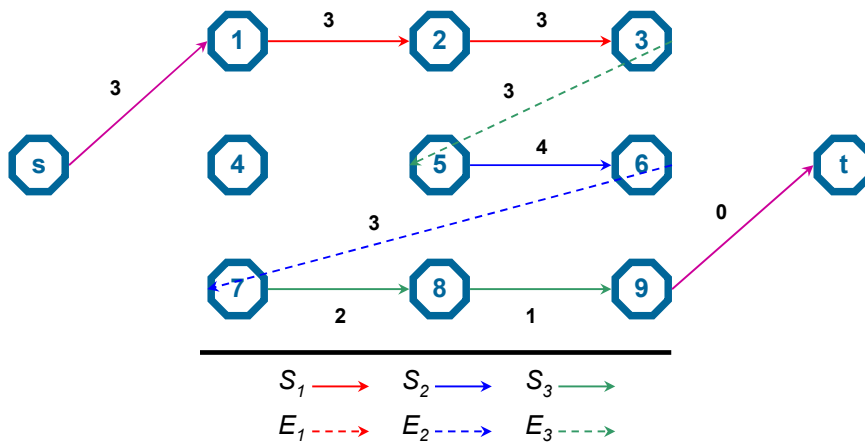


Fig. 8 Camino crítico

Cuando se observa más estrechamente la aplicación concreta de técnicas de *scheduling*,

se observa la presencia de elementos particulares que se agregan al problema. Estos elementos reflejan distintas circunstancias específicas que detallan precisamente el problema a resolver. Por un lado se debe considerar el modelo de producción utilizado y las condiciones concretas que resultan como consecuencias prácticas de su implementación, y por otro lado, aparecen necesidades esenciales que se deben precisar a la hora de definir el objetivo que se quiere alcanzar.

## **2.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO**

En este capítulo se presentó el problema de secuenciación de trabajos, más conocido como *Job-Shop Scheduling Problem*, y se detallaron las principales características del mismo. Se definió el modelo, presentando los objetivos y las restricciones de éste. Además, se utilizó el grafo como herramienta de análisis de este problema. Se distinguieron una gran diversidad de problemas los cuales derivan de las diferentes condiciones operativas que pueden adoptar las distintas configuraciones productivas. Se concluye que esta clase heterogénea de problemas es imposible de tratar de manera general con técnicas tradicionales de administración de la producción.

## CAPÍTULO 3:

### DISEÑO DE UN ALGORITMO EVOLUTIVO MULTI-OBJETIVO

#### PARA EL *JSSP*

Los algoritmos evolutivos fueron desarrollados inicialmente en el libro de Holland (1975), donde aparecieron tratados de una forma sistemática por primera vez. Entre los diferentes algoritmos evolutivos que se han utilizado en los últimos años, uno de los más interesantes en su desarrollo y aplicación es el Algoritmo Genético (*GA*, *Genetic Algorithm*) (Goldberg 1989). Desde el punto de vista de la investigación operativa estos algoritmos son clasificados como procedimientos inteligentes de búsqueda aleatoria (Coello Coello 2002). Están basados en la teoría de la selección natural y tienen la gran ventaja de que gracias a la separación fenotipo / genotipo pueden emplearse para buscar soluciones en ámbitos tan diversos como el análisis de imágenes, el procesamiento de señales, el diseño de robots autónomos y la programación automática, siendo también posible su uso en la resolución de problemas de optimización. En estos últimos, la ventaja principal de los *GAs* es la robustez, es decir, éstos son capaces de obtener soluciones sub-óptimas aún en los casos en los que la solución óptima es muy difícil de encontrar.

Los *GAs* están basados en un conjunto de individuos o población que tienen dos representaciones denominadas fenotipo y genotipo, siendo la primera una solución potencial del problema que se desea resolver y la segunda una codificación de dicha solución en forma de cromosoma. Un cromosoma está formado por una secuencia de genes que representan



características hereditarias. Los cromosomas de una población evolucionan en sucesivas iteraciones, denominadas generaciones. Los operadores genéticos, cruce y mutación, son mecanismos de recombinación genética capaces de generar nuevas cromosomas a partir de otros. La eficiencia del operador de cruce está directamente relacionada con su capacidad de recoger las características de los progenitores que los hacen buenos y recombinarlas para crear individuos mejores. El operador de mutación es el encargado de modificar esporádicamente a los individuos generados en el proceso de cruce, para evitar que en el transcurso de las iteraciones se generen individuos cada vez más homogéneos y la población se concentre alrededor de un mínimo local. El esquema general de un *GA* puede observarse en la Fig. 9.

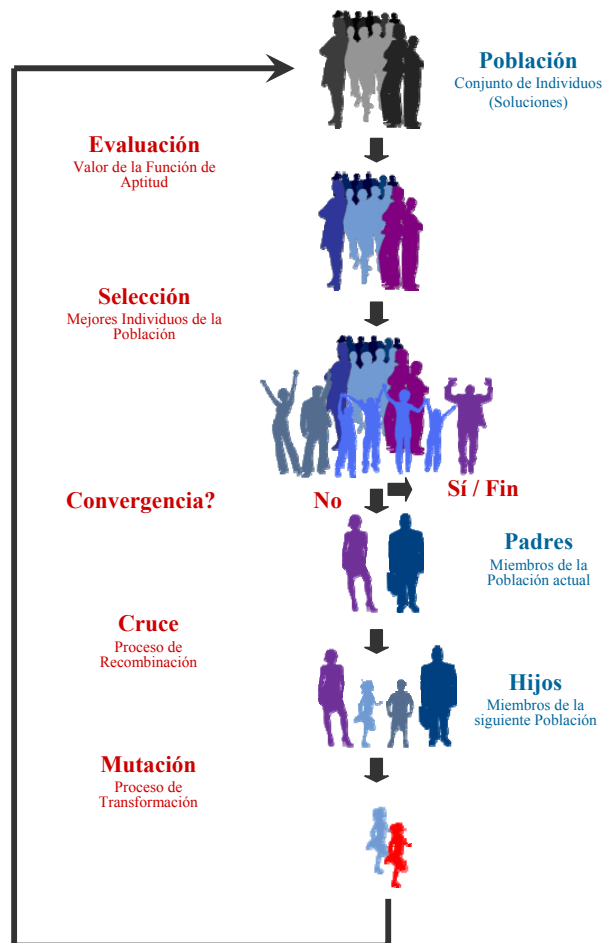


Fig. 9 Esquema general de un Algoritmo Genético

La justificación teórica sobre la convergencia de los *GAs* está fundamentalmente basada en codificaciones binarias. Así, Nakano y Yamada (1991) propusieron una re-

presentación binaria para el *JSSP* formada por una secuencia de *bits* para cada máquina en la que cada *bit* representaba cuál de las dos orientaciones de cada arco elegir. La máxima desventaja de esta codificación es que no aprovecha el conocimiento del problema y las restricciones del mismo, dando así lugar a que un gran número de nuevas soluciones obtenidas de operaciones de cruce y mutación no especializadas resulten infactibles, es decir, que no puedan ser traducidas en una programación válida. Los autores resolvían esta dificultad mediante un proceso denominado armonización consistente el cual deshacía los ciclos en el grafo disjunto correspondiente.

### **3.1 *JSSP* MULTI-OBJETIVO**

El *JSSP*, como fue mencionado con anterioridad, es uno de los problemas más tratados en la literatura, no sólo por ser el arquetipo de problema basado en el orden, sino también porque al ser un problema *NP-hard*, su resolución sirve como base para el tratamiento de otros problemas combinatorios. La mayoría de los *JSSP* involucran la optimización simultánea de dos o más objetivos, los cuales fueron descritos en el capítulo anterior (Cortés Rivera et al. 2003, Wu et al. 2004). Estos, generalmente, se encuentran en conflicto entre sí. Este tipo de problemas se denominan multi-objetivo. Estos, por su naturaleza, suelen tener múltiples soluciones. Estas soluciones se encuentran dentro del conjunto de programaciones activas (aquellas tales que no existen trabajos que puedan ser adelantados sin retrasar el inicio de las operaciones previas en el recurso), siendo este, un sub-conjunto contenido en el de las programaciones semiactivas (aquellas tales que ningún trabajo puede adelantarse sin modificar las precedencias o que se produzca un solapamiento dentro del recurso) (Frutos y Olivera 2008).

La optimización multi-objetivo es definida por Osyczka (1984) como: *“El problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfaga las restricciones y optimice una función vectorial cuyos elementos representen las funciones objetivo. Estas funciones forman una descripción matemática de criterios de desempeño que están usualmente en conflicto*

entre sí. Por lo tanto, el término optimizar significa encontrar aquella solución que dará un valor aceptable al diseñador en todas las funciones objetivo". Esta definición será formalizada posteriormente, pero antes es necesario introducir ciertos conceptos. En estas definiciones asumimos, sin pérdida de generalidad, la minimización de todos los objetivos.

**3.1.1 VARIABLES DE DECISIÓN:** son un conjunto de  $n$  parámetros cuyos valores dan una solución a un problema de optimización. Estos parámetros serán denotados como  $x_j, j = 1, 2, \dots, n$ . Estas variables de decisión serán representadas de la siguiente manera:  

$$\vec{x} = [x_1, \dots, x_n]^T .$$

**3.1.2 FUNCIÓN OBJETIVO:** forma el criterio de evaluación para saber que tan buena es una solución. En la optimización multi-objetivo existen dos o más funciones objetivo en cada problema. Estas, al igual que las restricciones, son funciones de las variables de decisión ( $f(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots]^T$ ).

**3.1.3 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO:** El Problema de Optimización Multi-objetivo (*MOP, Multi-objective Optimization Problem*) es encontrar un vector  $\vec{x}^* = [x_1^*, \dots, x_n^*]^T$  que satisfaga las  $q$  restricciones de desigualdad  $g_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, \dots, q$ , las  $p$  restricciones de igualdad  $h_i(\vec{x}) = 0, i = 1, \dots, p$ , y que minimice la función vector  $\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T$ , donde  $\vec{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$  es el vector de variables de decisión. El conjunto de todos los valores que satisfacen las restricciones define la región de soluciones factibles  $\Omega$  y cualquier punto en  $\vec{x} \in \Omega$  es una solución factible.

**3.1.4 OPTIMALIDAD DE PARETO:** Un punto  $\vec{x}^* \in \Omega$  es un óptimo de Pareto si para cada  $\vec{x} \in \Omega$ , hay al menos un  $i$  para el cual  $f_i(\vec{x}^*) \leq f_i(\vec{x})$ . Esta definición dice que  $\vec{x}^*$  es un óptimo de Pareto si no existe ningún vector factible  $\vec{x}$  que mejore algún objetivo sin causar simultáneamente un empeoramiento en al menos otro objetivo.

**3.1.5 DOMINANCIA DE PARETO:** Un vector  $\vec{u} = [u_1, \dots, u_n]^T$  se dice que domina a otro

vector  $\vec{v} = [v_1, \dots, v_n]^T$  (representado por  $\vec{u} \prec \vec{v}$ ) si y sólo si  $\vec{u}$  es parcialmente menor que  $\vec{v}$ , es decir,  $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, k\} : u_i < v_i$ .

**3.1.6 CONJUNTO ÓPTIMO DE PARETO:** Para un *MOP* dado  $\vec{f}(\vec{x})$ , el Conjunto Óptimo de Pareto se define como  $P^* = \{\vec{x} \in \Omega \mid \neg \exists \vec{x}' \in \Omega, \vec{f}(\vec{x}') \prec \vec{f}(\vec{x})\}$ .

**3.1.7 FRONTERA DE PARETO:** Para un *MOP* dado  $\vec{f}(\vec{x})$  y su Conjunto Óptimo de Pareto  $P^*$ , la Frontera de Pareto se define como  $FP^* = \{\vec{f}(\vec{x}), \vec{x} \in P^*\}$ .

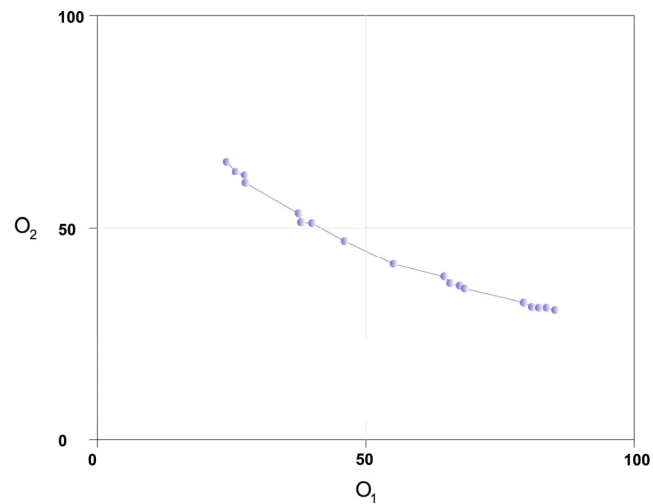
Obtener la frontera de Pareto a este tipo de problemas es la meta principal de la optimización multi-objetivo. De todas maneras, dado que esta frontera puede contener un gran número de puntos, una buena solución debe contener un número limitado de ellos, localizados lo más cerca posible de la frontera de Pareto exacta, y que estén uniformemente distribuidos, para que sean de la mayor utilidad posible al experto que interpreta las soluciones (Frutos et al. 2010).

### 3.2 ALGORITMOS MEMÉTICOS

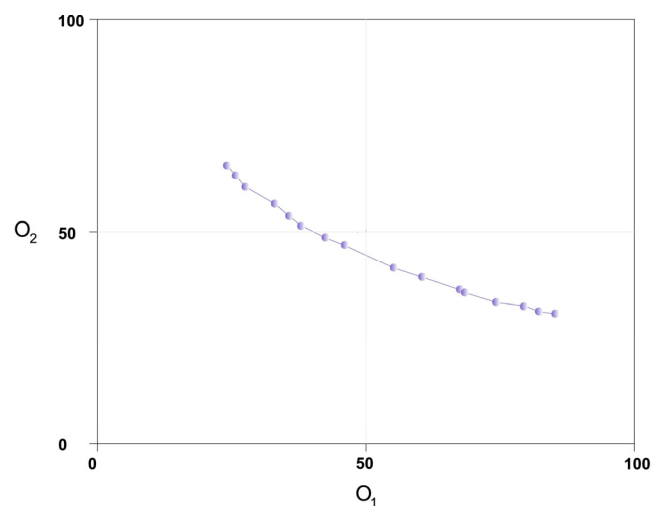
Debido a sus diversas ventajas, el uso de algoritmos evolutivos se ha vuelto muy popular en problemas de optimización. La alta tasa de convergencia de estos procedimientos, implica un costo en problemas multi-objetivo ya que se pierde diversidad de soluciones. Esto se refleja en fronteras de Pareto pobremente distribuidas (Fig. 10). Sin embargo, si se lo complementa con un método de búsqueda local eficiente, es posible diseñar un algoritmo multi-objetivo que requiera un número muy bajo de evaluaciones de la función de aptitud para obtener una frontera de Pareto mejor distribuida (Fig. 11). A este tipo de algoritmo combinado se lo llama Algoritmo Memético.

Estos algoritmos corresponden a un área de la programación evolutiva en la cual se combinan dos tipos de técnicas, como son los algoritmos evolutivos y la búsqueda local. La base filosófica que sustenta esta meta-heurística radica en la idea de que un individuo es capaz de alterar

información genética, la cual es traspasada a las generaciones siguientes por la vía biológica.



**Fig. 10** Frentes de Pareto (Sin búsqueda local)



**Fig. 11** Frentes de Pareto (Con búsqueda local)

Este concepto, es aprovechado para ser incorporado a la inteligencia artificial como un algoritmo evolutivo tradicional, al cual se le incorpora un procedimiento de búsqueda local. De esta manera, es posible hacer una analogía, en la cual el algoritmo evolutivo representa el proceso de evolución de los individuos y la búsqueda local se asocia a la alteración de elementos a los cuales cada individuo puede verse sometido durante su vida. Es así como un cromosoma antes de pasar a la generación siguiente, puede tomar una forma diferente cuando es alterado durante su existencia y puede traspasar a sus descendientes esta información por la vía genética (Fig. 12).

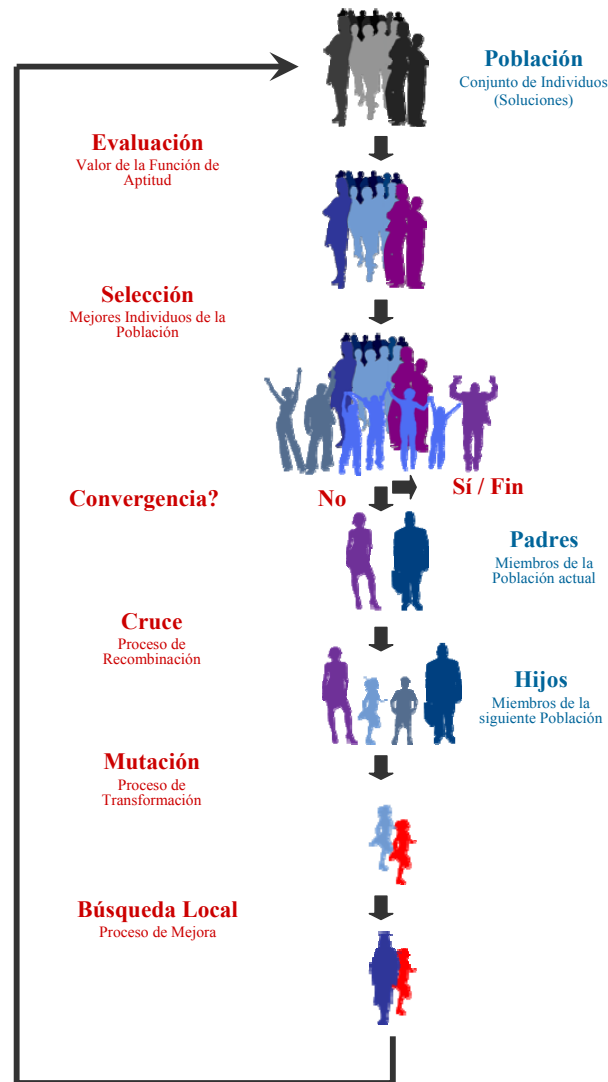


Fig. 12 Esquema general de un Algoritmo Memético

Esta herramienta ha sido utilizada con éxito en diferentes tipos de problemas preferentemente del tipo combinatorio (Jaszkiewicz 2004). En el área de problemas combinatorios asociados a la producción también existen aplicaciones exitosas de este tipo de algoritmo. La mayoría de los trabajos se concentran en el *Flow-Shop Scheduling Problem* (Ishibuchi et al. 2003).

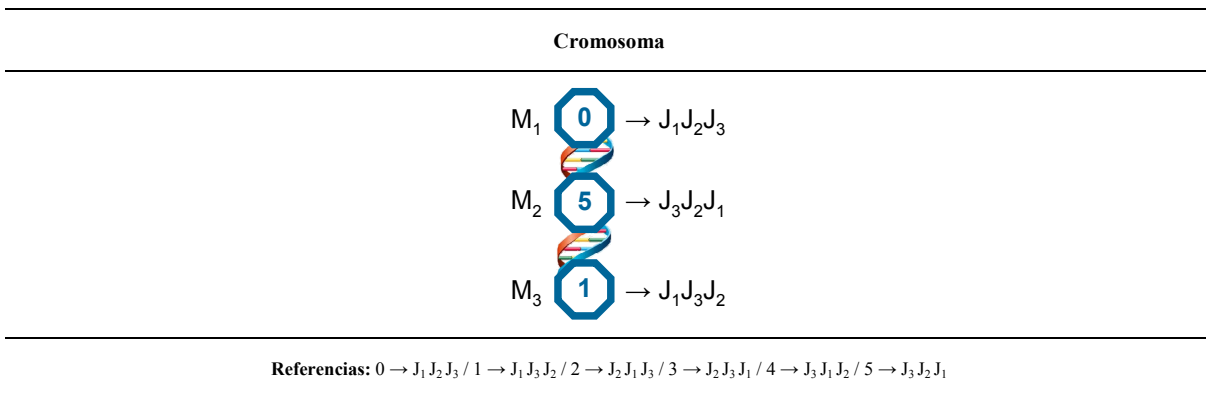
### 3.2.1 REPRESENTACIÓN DEL INDIVIDUO

Dentro del desarrollo de codificaciones que identifiquen a cada individuo de la población, Holsapple y Jacob (1993) proponen una representación basada en una secuencia de trabajos que indica la prioridad con la que se deben programar éstos. La longitud del cromosoma en este caso

se reduce a  $n$  números de trabajos. Sin embargo, no todas las soluciones posibles del problema pueden ser representadas de esta forma y, por lo tanto, no está garantizado el óptimo global. Dorndorf y Pesch (1995) propone un cromosoma basado en reglas de prioridad con criterios que determinan las operaciones prioritarias de entre aquellas que están en la cola de espera de una determinada máquina. Así, el cromosoma es una secuencia de números de longitud  $m \times n$  que indican reglas de prioridad. Nótese que no hay garantía de que todas las programaciones posibles pueden ser obtenidas mediante esta representación. Fang y Ross (1993), Reeves (1995) y Bierwirth (1995) emplean una formulación sin particiones en la que el número en cada posición indica el siguiente trabajo a programar. La primera operación todavía no programada en la secuencia técnica de dicho trabajo es determinada por la máquina donde se ejecuta. De este modo se garantiza la imposibilidad de generar genotipos infactibles y que todas las programaciones semiactivas pueden ser representadas. Croce y Tadei (1995) emplean una representación basada en una secuencia con particiones para cada máquina, donde cada una de estas sub-secuencias indica el orden en que los trabajos deben ser ejecutados en dicha máquina de modo que cada programación semiactiva sólo pueda ser representada por un único cromosoma. La desventaja de este tipo de representación es que existen cromosomas infactibles. Falkenauer y Bouffouix (1991) solucionan este problema interpretando la secuencia de cada máquina como una lista de preferencia, para que en caso de conflicto con la secuencia técnica de los trabajos, sea ésta la predominante. Yamada y Nakano (1992) garantiza que los cromosomas generados siempre son factibles y que representan programaciones activas gracias a un operador de cruce especializado.

Al tener en cuenta las diferentes ventajas y desventajas que poseen las representaciones analizadas, se diseñó una representación basada en la idea de Croce y Tadei (1995), es decir, una secuencia sin particiones, con un cromosoma de tamaño  $m$ , el cual se presenta como una lista ordenada de números enteros los cuales representan el orden en que los trabajos serán realizados en cada una de las máquinas (Frutos et al. 2010). Es decir, se

designa con valores entre 0 y  $n!-1$ , la secuencia de trabajos en cada máquina. Para el ejemplo planteado en el capítulo anterior,  $m = 3$  y  $n = 3$ , la referencia es  $0 \rightarrow J_1J_2J_3$ ,  $1 \rightarrow J_1J_3J_2$ ,  $2 \rightarrow J_2J_1J_3$ ,  $3 \rightarrow J_2J_3J_1$ ,  $4 \rightarrow J_3J_1J_2$  y  $5 \rightarrow J_3J_2J_1$  (Fig. 13). La secuencia de operaciones  $\pi_1$  en la máquina  $M_1$  es 1, 4 y 8, la secuencia de operaciones  $\pi_2$  en la máquina  $M_2$  es 7, 6 y 2, y la secuencia de operaciones  $\pi_3$  en la máquina  $M_3$  es 3, 9 y 5.



**Fig. 13** Cromosoma del Individuo

Para poder implementar esta aplicación, se almacena la información y se vincula cada número entero con una secuencia de trabajos (Frutos 2009). Esta codificación mostró una gran ventaja frente a las diversas propuestas presentadas por otros autores.

### 3.2.2 PROCESO DE SELECCIÓN

La selección se realizó utilizando la lógica *NSGAI* (Deb et al. 2002), es decir, los individuos atraviesan las dos rondas de selección establecida por esta estrategia en cada generación. Se considera que cada individuo tiene un rango  $r_i$  de no dominancia asociado (*non-dominance ranking*) el cual establece el número de soluciones que lo dominan, y una distancia  $d_i$  (*crowding distance*) la cual mide el espacio de búsqueda alrededor de él que no está ocupado por otra solución en la población. Una solución  $i$  se prefiere a una  $j$  si la solución  $i$  tiene mejor rango que  $j$ , es decir,  $r_i < r_j$ . Si las soluciones  $i$  y  $j$  tienen el mismo rango, se opta por aquella que tiene mejor (más alta) distancia  $d_i$  (exp. 12).



$$d_i = \sum_{j=1}^N (f_j^{i+1} - f_j^{i-1}) / (f_j^{m\acute{a}x} - f_j^{m\acute{i}n}) \quad (12)$$

Donde  $N$  es el número de objetivos del problema,  $f_j^{i+1}$  es el valor de la función objetivo  $j$  para el individuo siguiente al individuo  $i$ ,  $f_j^{i-1}$  es el valor de la función objetivo  $j$  para el individuo anterior al individuo  $i$ ,  $f_j^{m\acute{a}x}$  es el valor máximo para la función objetivo  $j$ ,  $f_j^{m\acute{i}n}$  es el valor mínimo para la función objetivo  $j$  (Fig. 14).

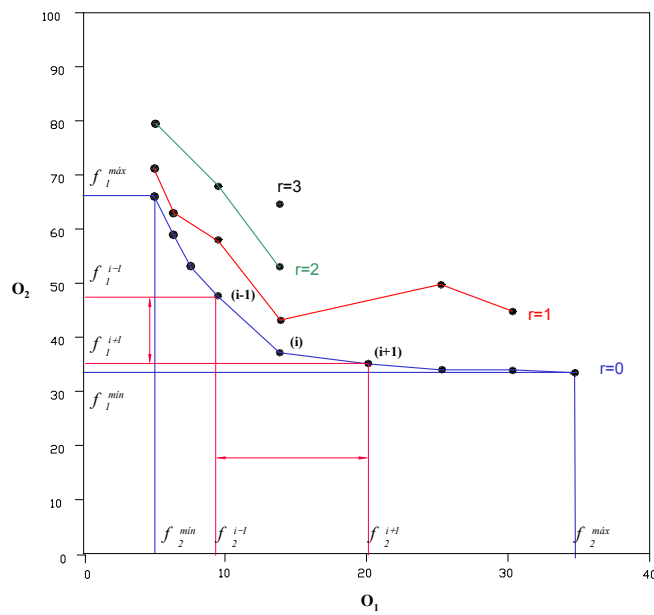


Fig. 14 Rango de no dominancia  $r_i$  y distancia  $d_i$

Las evaluaciones del primer nivel (orden  $r_i$ ) son más rápidas, mientras que los individuos que sobreviven hasta el segundo nivel, son evaluados más rigurosamente (orden  $d_i$ ). La ventaja de esta estrategia es reducir el tiempo total de cálculo. Este tipo de selección presenta un alto grado de elitismo, ya que garantiza la selección de los individuos más aptos.

### 3.2.3 OPERADOR DE CRUCE O RECOMBINACIÓN

El operador de cruce se aplica como es usualmente utilizado y se emplean los pares de padres obtenidos en el proceso de selección. A modo de ilustrar el procedimiento, se pueden ver en la Fig. 15 los padres a cruzar ( $P_1, 0 / 5 / 1, \pi_1: 1, 4$  y  $8, \pi_2: 7, 6$  y  $2, \pi_3: 3, 9$  y  $5, P_2, 1 / 4 / 2, \pi_1: 1, 8$  y  $4, \pi_2: 7, 2$  y  $6, \pi_3: 5, 3$  y  $9$ ).

Operador de Cruce /  $P_1$  y  $P_2$



Referencias:  $0 \rightarrow J_1 J_2 J_3 / 1 \rightarrow J_1 J_3 J_2 / 2 \rightarrow J_2 J_1 J_3 / 3 \rightarrow J_2 J_3 J_1 / 4 \rightarrow J_3 J_1 J_2 / 5 \rightarrow J_3 J_2 J_1$

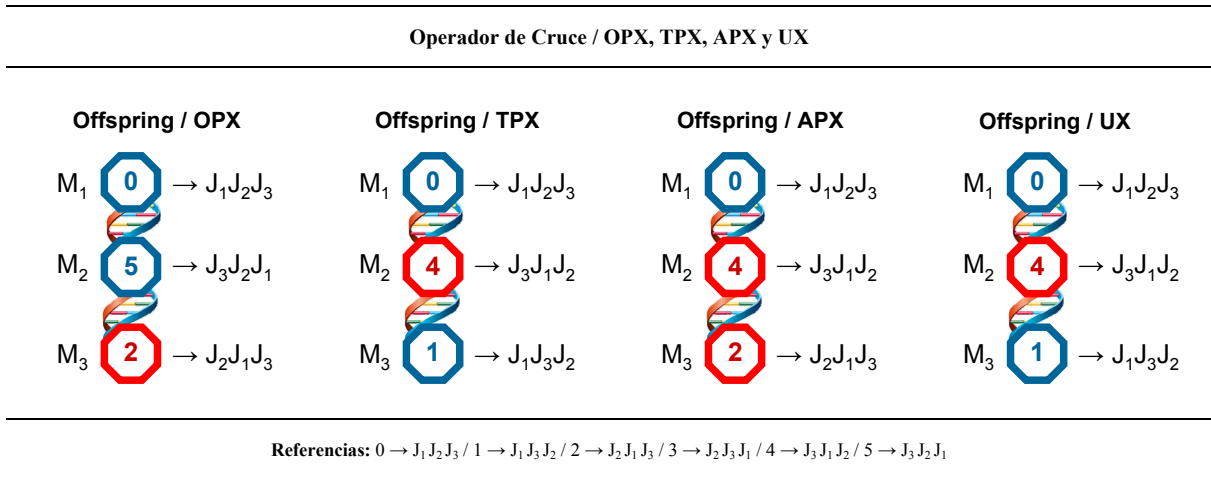
Fig. 15 Proceso de cruce,  $P_1$  y  $P_2$

Se ha experimentado con diferentes tipos de operadores de cruce. Entre ellos se encuentran: cruce con un punto de corte (*OPX*), cruce con dos puntos de corte (*TPX*), cruce que opera alternando posiciones (*APX*) y cruce uniforme (*UX*). El *OPX* selecciona un punto de corte en ambas cromosomas y para formar el *Offspring* toma la primera parte de  $P_1$ , y la segunda parte de  $P_2$  (Fig. 16, *OPX*,  $0 / 5 / 2$ ,  $\pi_1: 1, 4$  y  $8$ ,  $\pi_2: 7, 6$  y  $2$ , y  $\pi_3: 5, 3$  y  $9$ ). El *TPX* selecciona dos puntos de corte en ambas cromosomas y para formar el *Offspring* toma la primera y tercera parte de  $P_1$ , y la segunda parte de  $P_2$  (Fig. 16, *TPX*,  $0 / 4 / 1$ ,  $\pi_1: 1, 4$  y  $8$ ,  $\pi_2: 7, 2$  y  $6$ , y  $\pi_3: 3, 9$  y  $5$ ). El *APX* va seleccionando elemento de ambas cromosomas aleatoriamente y los va incorporando a una lista, inicialmente vacía, para formar al *Offspring* respetando el orden del elemento en cada cromosoma (Fig. 16, *APX*,  $0 / 4 / 2$ ,  $\pi_1: 1, 4$  y  $8$ ,  $\pi_2: 7, 2$  y  $6$ , y  $\pi_3: 5, 3$  y  $9$ ). Por último, el *UX* incorporando elementos de ambos padres uno a uno para formar el *Offspring* (Fig. 16, *UX*,  $0 / 4 / 1$ ,  $\pi_1: 1, 4$  y  $8$ ,  $\pi_2: 7, 2$  y  $6$ , y  $\pi_3: 3, 9$  y  $5$ ). El segundo *Offspring* se forma a la inversa. Luego de experimentar con estos operadores, se seleccionó a *UX*, ya que demostró mayor eficiencia.

### 3.2.4 OPERADOR DE MUTACIÓN

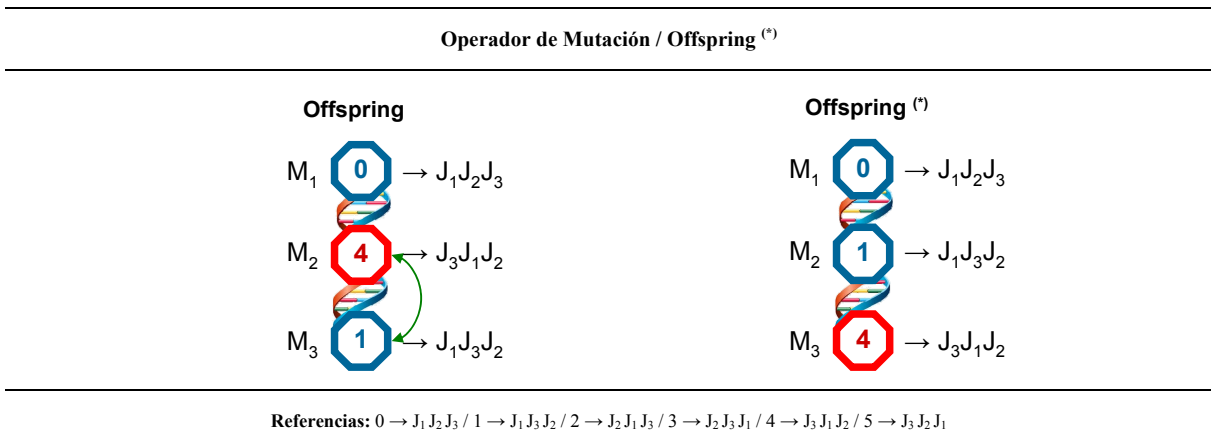
Los operadores de mutación pueden ser usados de diversas maneras. Algunos *GAs* no aplican cruce y sólo hacen uso del operador de mutación, mientras que otros combinan el uso de

ambos. Cuando se aplica una mutación, se debe obtener un individuo factible del problema que se está resolviendo. El objetivo de la mutación es modificar al individuo y aumentar la diversidad genética de la población. Se seleccionó para nuestra propuesta la mutación que opera realizando un intercambio recíproco de dos genes (*Two-swap*).



**Fig. 16** Proceso de cruce, *Offspring* (OPX, TPX, APX y UX)

El operador toma la cadena de enteros del *Offspring* y selecciona dos genes aleatoriamente e intercambia sus lugares. A modo de ilustrar el procedimiento, se toma al *Offspring* generado (Fig. 16, *Offspring*, 0 / 4 / 1,  $\pi_1$ : 1, 4 y 8,  $\pi_2$ : 7, 2 y 6, y  $\pi_3$ : 3, 9 y 5) y se produce la mutación intercambiando los genes 4 y 1 (Fig. 17, *Offspring*<sup>(\*)</sup>, 0 / 1 / 4,  $\pi_1$ : 1, 4 y 8,  $\pi_2$ : 3, 9 y 5, y  $\pi_3$ : 9, 3 y 5).



**Fig. 17** Proceso de mutación, *Offspring*<sup>(\*)</sup>

En la Fig. 18 se muestra el pseudo-código del algoritmo propuesto. Se adicionó en las líneas 6 y 15 el proceso de búsqueda local, el cual se describirá en el punto siguiente. Se generalizo la aplicación a  $f_1$  y  $f_2$ , ya que se pueden evaluar cualquier par de objetivos descriptos en el capítulo anterior.

---

```

0.   Generar población inicial ( $P_0$ ) de tamaño  $N$ 
1.   Decodificar y evaluar los objetivos  $f_1(x)$  y  $f_2(x)$  a todo individuo  $x \in P_0$ 
2.   Asignar valores  $r_i$  y  $d_i$  a todo individuo  $x \in P_0$ 
3.   Seleccionar Padres de  $P_0$ 
4.    $Q_0 =$  Cruzar ( $P_0$ )
5.    $Q'_0 =$  Mutar ( $Q_0$ )
6.    $Q''_0 =$  Búsqueda Local ( $Q'_0$ )
7.   for  $i = 0$  a  $g - 1$  do
8.       Decodificar y evaluar los objetivos  $f_1(x)$  y  $f_2(x)$  en todo individuo  $x \in Q''_i$ 
9.       Asignar valores  $r_i$  y  $d_i$  a todo individuo  $x \in Q''_i$ 
10.      Seleccionar de  $P_i \cup Q''_i$  los  $N$  individuos mejores y eliminar el resto
11.      Crear la siguiente generación  $P_{i+1}$ 
12.      Seleccionar Padres de  $P_{i+1}$ 
13.       $Q_{i+1} =$  Cruzar ( $P_{i+1}$ )
14.       $Q'_{i+1} =$  Mutar ( $Q_{i+1}$ )
15.       $Q''_{i+1} =$  Búsqueda Local ( $Q'_{i+1}$ )
16.  end for
17.  end

```

---

**Fig. 18** Seudo-código del algoritmo

### 3.2.5 BÚSQUEDA LOCAL

El uso de la búsqueda local en problemas de optimización combinatoria se remonta a 1950 cuando surge el primer algoritmo de intercambio de arcos para resolver el problema del viajante (*TSP, Travelling Salesman Problem*). En los años siguientes el alcance de la búsqueda local se amplió hasta incluir aplicaciones a problemas de toda índole. Hay muchas aplicaciones particulares de búsqueda local pero todas descansan sobre la utilización del concepto de entorno, el cual es usado para guiar la búsqueda iterativa hacia buenas soluciones. El objetivo principal de la búsqueda local es explorar las vecindades de los individuos en busca de mejores soluciones. Esta tipo de búsqueda se basa en la idea de que una determinada solución puede ser mejorada realizando sobre ella pequeños cambios.

Se tiene un conjunto de soluciones factibles cuya bondad viene dada por una función objetivo, que corresponde a la función que se desea optimizar (se supone que la dirección de optimización es de minimización). Se define para cada solución un entorno donde cada solución contenida en el conjunto de soluciones, es denominada vecino y puede ser alcanzada mediante un pequeño desplazamiento. Así, la ejecución de un algoritmo de búsqueda local determina un camino por el que cada solución visitada es vecina de la inmediata anterior. Los entornos dependen del problema a considerar y encontrar funciones para explorarlos eficientemente se plantea como uno de los desafíos de la búsqueda local. Hasta el momento, no hay disponibles reglas generales y cada situación debe ser apreciada separadamente. La literatura ofrece muchos ejemplos de funciones entorno y a menudo, hay disponibles diversas posibilidades para un mismo problema. Existen definiciones que consideran entornos de intercambio simple y entornos de intercambio complejos. El primero, se utiliza en muchos problemas de optimización combinatoria donde las soluciones pueden ser representadas como sucesiones o particiones. Estas representaciones permiten el uso de entornos de  $k$ -intercambios, esto es, entornos que se obtienen intercambiando  $k$  pares de elementos de una secuencia o partición dada. Es ampliamente conocido que para pequeños valores de  $k$ , los entornos de  $k$ -intercambios pueden ser explorados fácilmente pero producen, en promedio, soluciones de baja calidad. Por otro lado, para valores grandes de  $k$  se puede esperar mejores soluciones pero el tiempo necesario para verificar la optimalidad local puede contrarrestar ese beneficio. Debido a esto, la investigación se ha concentrado en el desarrollo y construcción de entornos más elaborados que puedan ser explorados sin un esfuerzo computacional excesivo. Este último es el caso de los entornos de intercambio complejos.

Muchos de los algoritmos de búsqueda local tienen la ventaja de ser flexibles o aplicables con gran generalidad. Esto indica que sólo requieren de una serie de pautas: especificaciones de solución, una función a optimizar, una función para generar el entorno y

un método eficiente para explorarlos. Todas ellas pueden procurarse sencillamente a partir de los problemas en la gran mayoría de las circunstancias. No obstante, puede darse con óptimos locales en muchos casos. Para remediar este inconveniente dentro del paradigma de búsqueda local, se ha estado investigando las posibilidades de extender el alcance de la búsqueda para obtener algoritmos de búsqueda por entornos que sean capaces de arribar a soluciones de alta calidad en tiempos convenientemente bajos.

### 3.2.5.1 RECOCIDO SIMULADO

Desde la década de los 80 el algoritmo de recocido simulado (*SA, Simulated Annealing*), desarrollado por Kirkpatrick (1984), ha sido empleado para resolver una gran variedad de problemas de optimización complejos, tanto basados en variables continuas como discretas. Entre éstos se pueden incluir el diseño de bases de datos distribuidas, configuración de aplicaciones multi-procesador, diseño de filtros digitales, problemas electrostáticos, análisis de imágenes, entre otros. El algoritmo *SA* es uno de los procedimientos de búsqueda local más eficientes en la actualidad junto a *Taboo Search* (Taillard 1994). Este algoritmo comienza con una solución  $x$  dada para el problema o puede generarla aleatoriamente. Seguido a esto, procede al cálculo de la función objetivo de dicha solución  $f(x)$ . El algoritmo evoluciona realizando pequeños desplazamientos que son aceptados si el valor de la función objetivo es inferior a la solución anterior. En caso contrario la solución es aceptada con una probabilidad que decrece exponencialmente con el cociente de la diferencia entre los valores de la función objetivo ( $\delta$ ) y un parámetro  $T$  que representa la temperatura (exp. 13).

$$e^{-\delta/T} \tag{13}$$

En el caso de analizar  $N$  objetivos, existen diferentes formas de plantear  $\delta$ . Para nuestra propuesta se tomo  $\delta$  como la máxima desviación normalizada, en referencia a los diferentes objetivos involucrados, que presenta la nueva solución con respecto a la solución actual (exp. 14).

$$\delta = \max \left( \frac{f_i(x') - f_i(x)}{f_i(x)} \right), \forall i = 1, \dots, N \quad (14)$$

Si la nueva solución no fuera aceptada, se probaría un nuevo movimiento desde la solución anterior. El hecho de que la probabilidad de aceptar soluciones peores no sea nula permite que el algoritmo no quede atrapado en un mínimo local. A lo largo de una ejecución, la temperatura  $T$  va disminuyendo de acuerdo a una velocidad de enfriamiento  $\alpha$  (exp. 15), reduciéndose así la probabilidad de desplazamientos ascendentes (aquellos que aumentan el valor de la función objetivo) y manteniendo a la solución en valores óptimos.

$$T_{próxima} = \alpha T_{actual} \quad (15)$$

El algoritmo termina cuando no se ha obtenido ninguna mejora en un número determinado de desplazamientos o cuando se ha alcanzado la temperatura final  $T_f$ . Van Laarhoven et al. (1992), demuestra que en condiciones apropiadas, este algoritmo explora eficientemente el entorno de la solución. Un elemento determinante del algoritmo  $SA$  es la función que genera el entorno, la cual permite la creación de soluciones cercanas o vecinas. Van Laarhoven et al. (1992) obtiene el entorno mediante la inversión de los arcos entre operaciones que se ejecutan en la misma máquina. Matsuo et al. (1989), demostró que las soluciones así generadas siempre serán factibles, y seguirán siendo las más prometedoras.

Siguiendo esta idea, se presenta una función para generar el entorno que se basa en tomar una de las máquinas y cambiar de manera aleatoria el valor que define la secuencia en ella (Frutos y Tohmé 2009). Esta alteración hace que en un solo movimiento se puedan intercambiar más de un arco entre las operaciones a realizarse en una misma máquina. A modo de ilustrar el procedimiento, se toma al  $Offspring^{(*)}$  generado (Fig. 17,  $Offspring^{(*)}$ , 0 / 1 / 4,  $\pi_1$ : 1, 4 y 8,  $\pi_2$ : 3, 9 y 5, y  $\pi_3$ : 9, 3 y 5) y se produce el cambio alterando el valor del gen que corresponde a la máquina  $M_2$  de 1 y 5 (Fig. 19,  $Offspring^{(**)}$ , 0 / 5 / 4,  $\pi_1$ : 1, 4 y 8,  $\pi_2$ : 9, 5 y 3, y  $\pi_3$ : 9, 3 y 5).

Función para generar el entorno / Offspring (\*\*)

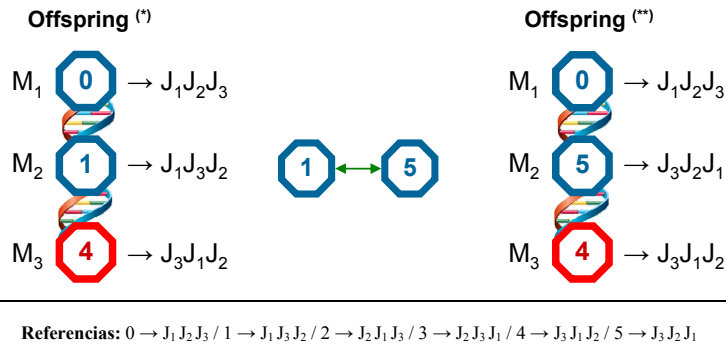


Fig. 19 Función para generar el entorno, *Offspring* (\*\*)

Esta alteración se realiza  $M$  veces para cada valor de temperatura  $T$ . El número de tentativas  $M$  depende del estado actual de la temperatura  $T$  y de un parámetro de control  $\omega$  (exp. 16).

$$M = \left\lfloor \frac{I}{T} \right\rfloor + \omega \quad (16)$$

En la Fig. 20 se muestra el pseudo-código del algoritmo *SA*. Se observan las entradas del algoritmo y los parámetros de ejecución. Se generalizó la aplicación a  $f_1$  y  $f_2$ , ya que se pueden evaluar cualquier par de objetivos descritos en el capítulo anterior.

0. Tomar como solución inicial a todo individuo  $x \in Q'_{i+1}$
1. **while**  $T > T_f$
2.     Calcular  $M = \lfloor I/T \rfloor + \omega$
3.     **for**  $i = 1$  a  $M$
4.         Alterar Solución  $x$  y obtener  $x'$
5.         Decodificar y evaluar los objetivos  $f_1(x')$  y  $f_2(x')$  a  $x'$
6.         **if** Mejora  $f_1$  y  $f_2$
7.             **then** Cambiar Solución
8.         **if** Mejora  $f_1$  o  $f_2$  sin empeorar  $f_2$  o  $f_1$
9.             **then** Cambiar Solución
10.         **if** Empeora  $f_1$  y/o  $f_2$
11.             **then**
12.                 **if**  $\zeta(0, I) < e^{-\delta/T}$
13.                     **then** Cambiar Solución
14.                     **end if**
15.             **end if**
16.         **end for**
17.          $T = \alpha(T)$
18.     **end while**
19. **end**

Fig. 20 Pseudo-código del algoritmo *SA*



En la aplicación del algoritmo *SA*, es clave la determinación de la temperatura inicial  $T_i$ , así como la velocidad de enfriamiento  $\alpha$ , el número de tentativas  $M$  para cada nivel de temperatura  $T$ , el parámetro de control  $\omega$  y la temperatura final  $T_f$ .

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

El algoritmo memético multi-objetivo inspirado en *NSGAI*, que a partir de ahora se presentara como *(LS)NSGAI*, fue implementado sobre la base de la plataforma *PISA* (Bleuler et al. 2003). Inicialmente, para poder establecer la codificación del individuo, fue necesario almacenar información, la cual vinculará el número entero que presenta cada gen con una secuencia de trabajos dada. Esta etapa es previa a la inicialización del algoritmo (Fig. 21).

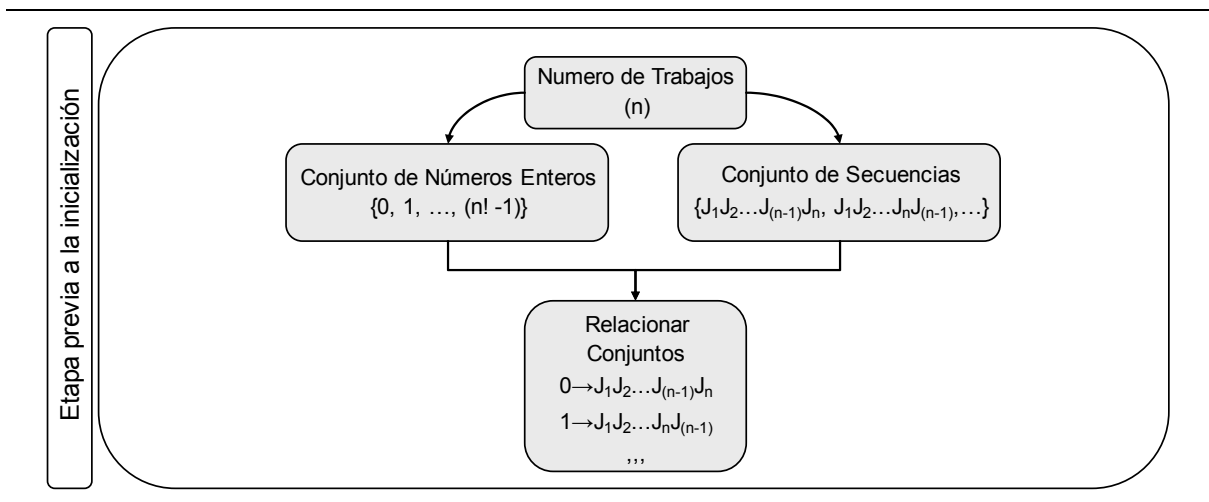


Fig. 21 Etapa previa a la inicialización del algoritmo

Esto se realiza por única vez, por lo que el tiempo que demanda esta etapa no se tuvo en cuenta en el proceso general. Luego de generar esta información, se puede experimentar con diferentes ejemplos con igual cantidad de trabajos a realizar. *PISA* permitió el uso de herramientas de estadística para la evaluación del algoritmo. En la Fig. 22 se observa la estructura del algoritmo con la plataforma *PISA* utilizada en la etapa evolutiva. Para la implementación de esta etapa se ha empleado la librería de *PISA* que contiene el código genérico para el *GA*. Únicamente ha sido necesario implementar el cálculo de la bondad de los cromosomas al ser estos específicos para el *JSSP*.

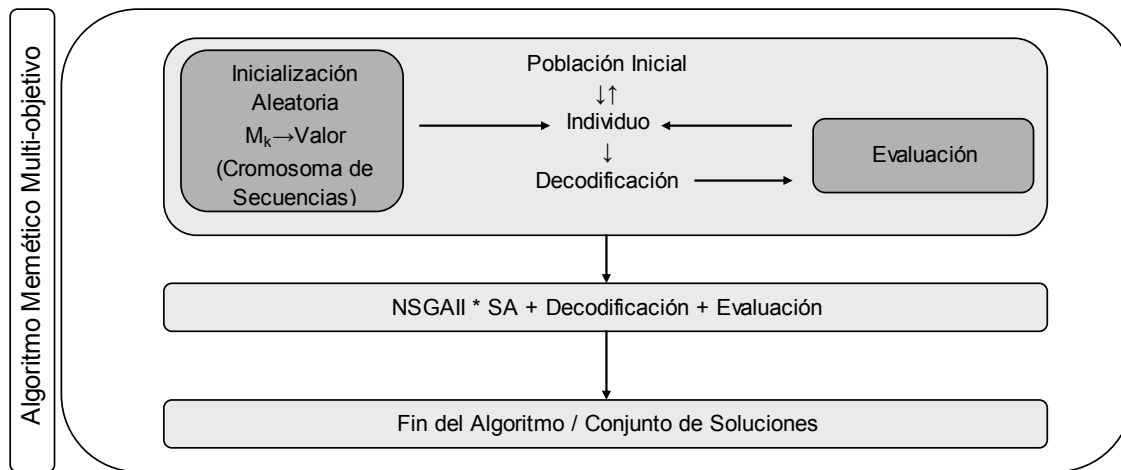


Fig. 22 Estructura del algoritmo

Las soluciones se representan en forma de secuencia de números enteros sin particiones. En la implantación del algoritmo *SA* se ha empleado el algoritmo genérico de Stiles y Lee (2003), ya que *PISA* no contaba con este código. Además, fue necesario implantar la función que genera el entorno. Realizando una visión integradora del algoritmo, el método completo se muestra en la Fig. 23.

### 3.4 ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD DEL ALGORITMO DESARROLLADO

Antes de ir a los resultados de la aplicación de este algoritmo, se dará un breve análisis de la complejidad del mismo. Para el caso de *NSGAI* (Deb et al. 2002), ha sido demostrado en investigaciones previas que se necesita un tiempo del orden de  $O(g*N^2)$  teniendo en cuenta una población de tamaño  $2N$  para el criterio de dominación. El cálculo de las distancias que requiere *NSGAI* necesita no menos de  $O(g*N*logN)$  por lo que el procedimiento *NSGAI* completo es del orden de  $O(g*N^2)$ . El algoritmo *SA* necesita en el peor de los casos un tiempo del orden de  $O(M*logM)$ . En  $g$  generaciones, el tiempo total de procesamiento del algoritmo es del orden de  $O(gN^3*logN)$  con  $N > M$ .

### 3.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentaron las principales características del algoritmo memético multi-

objetivo propuesto, *(LS)NSGAI*, para el tratamiento del JSSP. Este algoritmo posee una etapa de pre-inicialización la cual vincula la información genética con las diferentes secuencias de trabajos ya pre-definidas. Dentro del proceso evolutivo se incorpora una meta-heurística de búsqueda local, la cual permite una exploración más eficiente del espacio de soluciones.

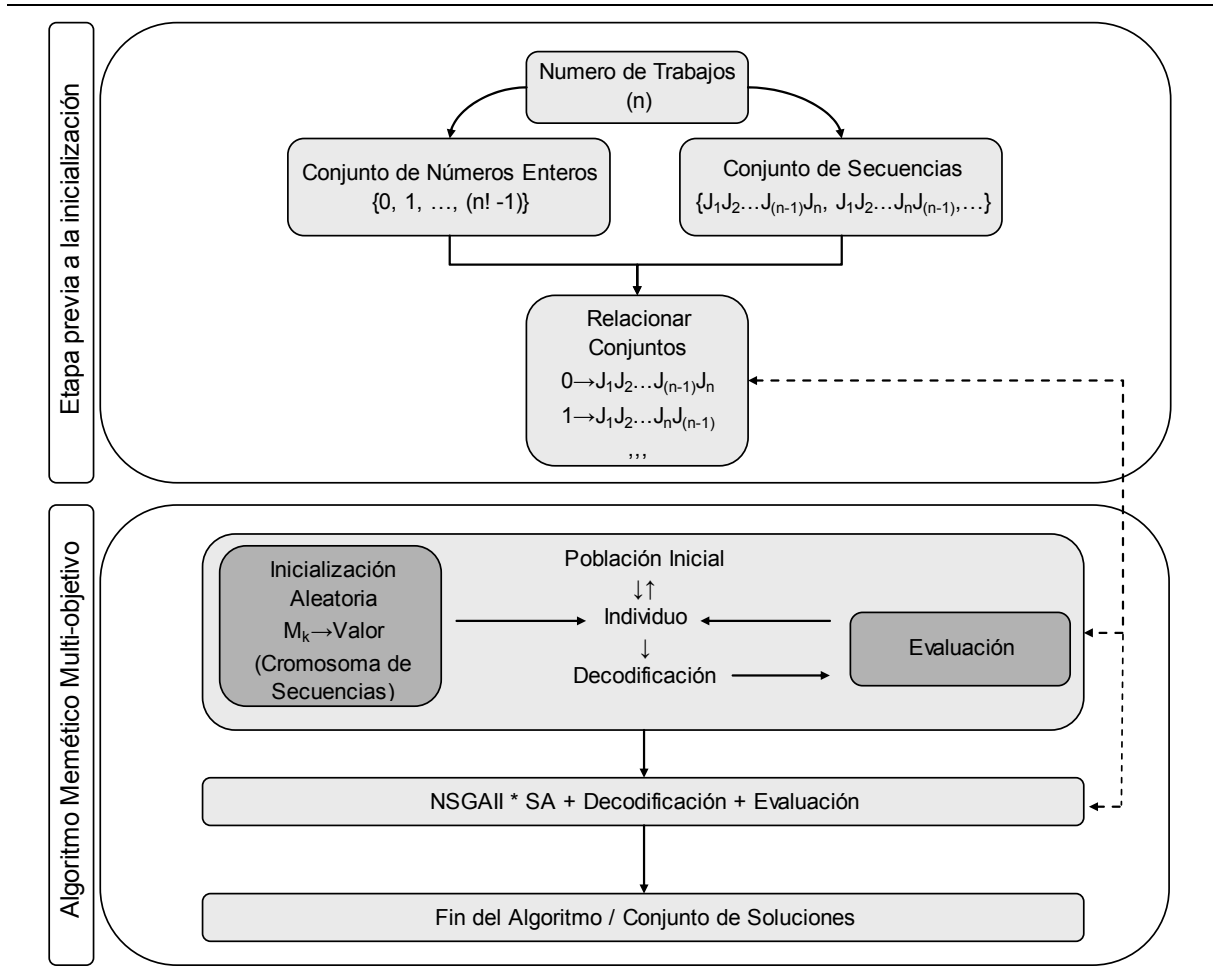


Fig. 23 Visión integral del algoritmo

## CAPÍTULO 4:

### DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

Muchos investigadores han probado diferentes metodologías de solución en problemas de secuenciación de trabajos usando casos reales o generados aleatoriamente. En la gran mayoría de estos casos los resultados no han sido publicados. Debido a esta situación aparece un conjunto de problemas con diferentes grados de dificultad para el *JSSP* que sirven como casos de prueba (Beasley 1990).

El rango de los problemas extraídos, usados para experimentar el algoritmo, corresponden a las instancias *ft* (Fisher H. y Thompson 1963) y *la* (Lawrence 1984). Los problemas de la clase *ft* son los más populares en cuanto al *JSSP* se refiere. Son 3 pero solamente los problemas *ft10* y *ft20* presentan mayor dificultad para resolverlos, ya que *ft06* es muy sencillo de resolver, dado su tamaño. Los de la clase *la* son 40 problemas muy variados en cuanto a tamaño y complejidad. Estas instancias comprenden casos desde 6 trabajos y 6 máquinas hasta casos de 15 trabajos y 15 máquinas (Anexo 2). Se realizó una aplicación completa sobre estos problemas, presentándose los resultados alcanzados.

#### 4.1 RESULTADOS ALCANZADOS

En este punto se muestran los resultados que se obtuvieron de los problemas seleccionados de la literatura especializada (*ft06*, *ft10*, *ft20* y *la01 a la40*). En un análisis preliminar respecto de la evolución de las mejores soluciones, se verificó que el proceso de mejoramiento de soluciones tiende a estabilizarse en torno a la generación 200, por lo que se definió el número de

generaciones igual a 500, dando así un margen para un mejoramiento tardío de la solución. Los parámetros y las características del equipamiento utilizado durante los ensayos fueron: tamaño de la población: 200, número de generaciones: 500, tipo de cruce: *Uniform*, probabilidad de cruce: 0.90, tipo de mutación: *Two-swap*, probabilidad de mutación: 0.01, tipo de búsqueda local: *Simulated Annealing* ( $T_i$ : 850,  $T_f$ : 0.01,  $\alpha$ : 0.95,  $\omega$ :10), probabilidad de búsqueda local: 0.01, CPU: 3.00 GHZ. y RAM: 1.00 GB.

Se observa de Tabla 3 a Tabla 13, la frecuencia de los mejores resultados alcanzados para el *Makespan* en las 20 experiencias realizadas con el algoritmo propuesto. Se muestra, además, la mejor solución conocida (*BKS*, *Best Know Solution*) a modo de poder comparar los resultados. Se adiciona un análisis estadísticos de los resultados donde se presenta el valor medio del *Makespan* ( $\overline{C_{m\acute{a}x}}$ ) y la desviación estándar poblacional ( $s$ ). Además, se muestra el tiempo medio  $\overline{Time}$  de ejecución del algoritmo.

Se aprecia que de los 43 problemas resueltos, solo en 13 de ellos no se ha llegado a la mejor solución conocida (*BKS*). Cabe destacar, que en estos casos se esta muy cerca del valor óptimo. Se puede justificar esta situación ya que se están optimizando más de un objetivo, y la *BKS* reportada fue extraída de un enfoque mono-objetivo.

**Tabla 3** Resultados para *ft06*, *ft10*, *ft20* y *la01*

<i>ft06</i> (BKS: 55,00)		<i>ft10</i> (BKS: 930,00)		<i>ft20</i> (BKS: 1165,00)		<i>La01</i> (BKS: 666,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
11	55,00	2	930,00	7	1165,00	20	666,00
2	56,00	7	949,00	5	1173,00	-	-
4	57,00	2	967,00	3	1175,00	-	-
3	58,00	1	973,00	1	1178,00	-	-
-	-	3	993,00	3	1180,00	-	-
-	-	5	1003,00	1	1214,00	-	-
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 55,95		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 970,20		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1173,85		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 666,00	
$s$ : 1,16		$s$ : 25,83		$s$ : 10,72		$s$ : 0,00	
$\overline{Time}$ : 0,25 seg.		$\overline{Time}$ : 9,25 seg.		$\overline{Time}$ : 7,22 seg.		$\overline{Time}$ : 0,24 seg.	

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

**Tabla 4** Resultados para *la02*, *la03*, *la04* y *la05*

<i>la02</i> (BKS: 655,00)		<i>la03</i> (BKS: 597,00)		<i>la04</i> (BKS: 590,00)		<i>la05</i> (BKS: 593,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
9	655,00	11	597,00	5	590,00	20	593,00
7	660,00	5	603,00	4	595,00	-	-
2	662,00	1	615,00	2	597,00	-	-
2	669,00	3	621,00	7	598,00	-	-
-	-	-	-	2	611,00	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 658,85		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 603,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 596,60		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 593,00	
s : 4,29		s : 8,69		s : 5,73		s : 0,00	
$\overline{Time}$ : 0,21 seg.		$\overline{Time}$ : 1,64 seg.		$\overline{Time}$ : 1,23 seg.		$\overline{Time}$ : 0,23 seg.	

**Tabla 5** Resultados para *la06*, *la07*, *la08* y *la09*

<i>la06</i> (BKS: 926,00)		<i>la07</i> (BKS: 890,00)		<i>la08</i> (BKS: 863,00)		<i>la09</i> (BKS: 951,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
20	926,00	20	890,00	16	863,00	20	951,00
-	-	-	-	4	870,00	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 926,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 890,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 864,40		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 951,00	
s : 0,00		s : 0,00		s : 2,80		s : 0,00	
$\overline{Time}$ : 0,41 seg.		$\overline{Time}$ : 0,43 seg.		$\overline{Time}$ : 0,62 seg.		$\overline{Time}$ : 0,57 seg.	

**Tabla 6** Resultados para *la10*, *la11*, *la12* y *la13*

<i>la10</i> (BKS: 958,00)		<i>la11</i> (BKS: 1222,00)		<i>la12</i> (BKS: 1039,00)		<i>la13</i> (BKS: 1150,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
20	958,00	20	1222,00	20	1039,00	20	1150,00
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 958,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1222,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1039,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1150,00	
s : 0,00		s : 0,00		s : 0,00		s : 0,00	
$\overline{Time}$ : 0,41 seg.		$\overline{Time}$ : 0,62 seg.		$\overline{Time}$ : 0,49 seg.		$\overline{Time}$ : 0,67 seg.	

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

**Tabla 7** Resultados para *la14*, *la15*, *la16* y *la17*

<i>la14</i> (BKS: 1292,00)		<i>la15</i> (BKS: 1207,00)		<i>la16</i> (BKS: 945,00)		<i>la17</i> (BKS: 784,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
20	1292,00	20	1207,00	5	945,00	3	784,00
-	-	-	-	1	947,00	5	785,00
-	-	-	-	3	960,00	4	787,00
-	-	-	-	1	970,00	2	790,00
-	-	-	-	3	979,00	2	793,00
-	-	-	-	7	982,00	4	797,00
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1292,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1207,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 966,65		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 788,95	
s: 0,00		s: 0,00		s: 15,78		s: 4,80	
$\overline{Time}$ : 0,52 seg.		$\overline{Time}$ : 1,85 seg.		$\overline{Time}$ : 15,42 seg.		$\overline{Time}$ : 9,05 seg.	

**Tabla 8** Resultados para *la18*, *la19*, *la20* y *la21*

<i>la18</i> (BKS: 848,00)		<i>la19</i> (BKS: 842,00)		<i>la20</i> (BKS: 902,00)		<i>la21</i> (BKS: 1046,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
3	848,00	5	842,00	2	910,00	3	1047,00
2	857,00	3	848,00	4	911,00	3	1050,00
11	861,00	2	854,00	8	912,00	1	1059,00
1	882,00	5	860,00	3	914,00	4	1062,00
3	907,00	3	868,00	2	934,00	4	1082,00
-	-	2	882,00	1	955,00	5	1093,00
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 866,60		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 856,50		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 916,25		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1069,55	
s: 18,30		s: 12,33		s: 11,13		s: 17,86	
$\overline{Time}$ : 0,27 seg.		$\overline{Time}$ : 7,40 seg.		$\overline{Time}$ : 13,57 seg.		$\overline{Time}$ : 537,23 seg.	

**Tabla 9** Resultados para *la22*, *la23*, *la24* y *la25*

<i>la22</i> (BKS: 927,00)		<i>la23</i> (BKS: 1032,00)		<i>la24</i> (BKS: 935,00)		<i>la25</i> (BKS: 977,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
5	935,00	20	1032,00	7	956,00	3	986,00
2	941,00	-	-	3	958,00	2	990,00
4	943,00	-	-	6	963,00	8	993,00
1	949,00	-	-	4	979,00	3	997,00
2	974,00	-	-	-	-	1	1005,00
6	982,00	-	-	-	-	3	1008,00
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 955,90		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1032,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 963,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 995,10	
s: 20,10		s: 0,00		s: 8,49		s: 6,87	
$\overline{Time}$ : 81,20 seg.		$\overline{Time}$ : 0,37 seg.		$\overline{Time}$ : 40,09 seg.		$\overline{Time}$ : 158,11 seg.	

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE EXPERIMENTOS

**Tabla 10** Resultados para *la26*, *la27*, *la28* y *la29*

<i>la26</i> (BKS: 1218,00)		<i>la27</i> (BKS: 1235,00)		<i>la28</i> (BKS: 1216,00)		<i>la29</i> (BKS: 1157,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
9	1218,00	5	1236,00	7	1232,00	5	1190,00
2	1220,00	2	1240,00	2	1234,00	4	1198,00
7	1223,00	6	1246,00	10	1236,00	6	1201,00
1	1232,00	4	1256,00	1	1263,00	1	1216,00
1	1239,00	2	1257,00	-	-	4	1222,00
-	-	1	1260,00	-	-	-	-
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1221,70		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1246,70		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1235,75		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1202,60	
s: 5,23		s: 8,37		s: 6,51		s: 11,36	
$\overline{Time}$ : 0,71 seg.		$\overline{Time}$ : 2135,89 seg.		$\overline{Time}$ : 52,02 seg.		$\overline{Time}$ : 1385,01 seg.	

**Tabla 11** Resultados para *la30*, *la31*, *la32* y *la33*

<i>la30</i> (BKS: 1355,00)		<i>la31</i> (BKS: 1784,00)		<i>la32</i> (BKS: 1850,00)		<i>la33</i> (BKS: 1719,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
20	1355,00	10	1784,00	7	1850,00	8	1719,00
-	-	2	1786,00	6	1851,00	4	1721,00
-	-	5	1789,00	1	1858,00	1	1722,00
-	-	1	1790,00	5	1859,00	4	1724,00
-	-	2	1792,00	1	1866,00	2	1725,00
-	-	-	-	-	-	1	1727,00
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1355,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1786,55		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1853,75		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1721,55	
s: 0,00		s: 2,89		s: 4,74		s: 2,56	
$\overline{Time}$ : 0,23 seg.		$\overline{Time}$ : 0,20 seg.		$\overline{Time}$ : 16,04 seg.		$\overline{Time}$ : 0,27 seg.	

**Tabla 12** Resultados para *la34*, *la35*, *la36* y *la37*

<i>la34</i> (BKS: 1721,00)		<i>la35</i> (BKS: 1888,00)		<i>la36</i> (BKS: 1268,00)		<i>la37</i> (BKS: 1397,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
11	1721,00	4	1888,00	5	1279,00	3	1408,00
4	1728,00	4	1897,00	7	1281,00	8	1425,00
2	1729,00	5	1898,00	4	1291,00	2	1426,00
2	1733,00	2	1904,00	2	1301,00	4	1430,00
1	1744,00	3	1912,00	1	1302,00	2	1440,00
-	-	2	1915,00	1	1316,00	1	1453,00
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1725,55		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1900,20		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1287,30		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1426,45	
s: 6,03		s: 8,79		s: 10,23		s: 10,39	
$\overline{Time}$ : 0,33 seg.		$\overline{Time}$ : 11,31 seg.		$\overline{Time}$ : 44,41 seg.		$\overline{Time}$ : 1001,58 seg.	



**Tabla 13** Resultados para *la38*, *la39* y *la40*

<i>la38</i> (BKS: 1196,00)		<i>la39</i> (BKS: 1233,00)		<i>la40</i> (BKS: 1222,00)	
Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$	Frecuencia	$C_{m\acute{a}x}$
4	1219,00	2	1246,00	12	1229,00
1	1231,00	3	1249,00	6	1234,00
8	1235,00	9	1250,00	1	1245,00
3	1243,00	2	1255,00	1	1261,00
2	1248,00	3	1258,00	-	-
2	1264,00	1	1259,00	-	-
$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1237,00		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1251,60		$\overline{C_{m\acute{a}x}}$ : 1232,90	
$s$ : 12,59		$s$ : 3,92		$s$ : 7,50	
$\overline{Time}$ : 1171,88 seg.		$\overline{Time}$ : 629,34 seg.		$\overline{Time}$ : 618,03 seg.	

A modo de establecer la eficiencia de *(LS)NSGAI*, se propone comparar el mismo con otros tres algoritmos evolutivos multi-objetivos (*MOEA*, *Multi-Objective Evolutionary Algorithm*). Los *MOEAs* utilizados fueron: *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)* (Srinivas 1994), *Strength Pareto Evolutionary algorithm (SPEA)* (Zitzler and Thiele 1999) y *Strength Pareto Evolutionary algorithm II (SPEAII)* (Zitzler et al. 2002). Para mayor información acerca de la implementación de ellos, se sugiere leer las publicaciones de referencia.

A continuación se dará una breve descripción de estos procedimientos. El algoritmo *NSGA* clasifica los individuos en varias capas o frentes. Esta clasificación consiste en agrupar a todos los individuos no dominados en un frente, con un valor de *fitness* igual para todos los individuos. Este valor es proporcional al tamaño de la población, para así proporcionar un potencial reproductivo igual para todos los individuos de este frente. Entonces, el grupo de individuos clasificados es ignorado y otro frente de individuos es considerado. El proceso continúa hasta que se clasifican a todos los individuos en la población. Puesto que los individuos en el primer frente tienen el valor de *fitness* mayor, consiguen siempre más atención que el resto de la población. *SPEA*, es un algoritmo que utiliza un archivo que contiene las

soluciones no dominadas encontradas. En cada generación, se copian los individuos no dominados a ese archivo y se borra de este las soluciones dominadas. Para cada individuo en el sistema externo, se computa un valor de fuerza o *strength* proporcional al número de las soluciones a las cuales cada individuo domina. En *SPEA*, el *fitness* de cada miembro de la población actual se computa según las fuerzas de todas las soluciones no dominadas externas que la dominen. *SPEAII* tiene diferencias importantes con respecto a su precursor. Este algoritmo incorpora una estrategia fina de asignación del *fitness* que considera, para cada individuo, el número de los individuos que lo dominan y el número de los individuos por los cuales es dominado. Además, utiliza la técnica del “vecino más cercano” para la valoración de la densidad, dirigiendo la búsqueda en forma más eficiente.

Seguido a esto, para los problemas *la01*, *la02*, *la03*, *la04*, *la05*, *la06*, *la07*, *la08*, *la09* y *la10*, se muestran los resultados obtenidos con los algoritmos presentados para un análisis multi-objetivo involucrando inicialmente al *Makespan* y al *Mean flow time*, y luego al *Makespan* y al *Delay*. Los resultados se obtuvieron de la siguiente manera. Se corrió cada algoritmo 10 veces. Se obtuvo para cada algoritmo los conjuntos de soluciones no dominadas:  $P_1, P_2, \dots, P_{10}$ . Se creó para cada algoritmo una superpoblación  $P_T = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_{10}$ . De cada superpoblación se extrajeron las soluciones no dominadas, formando así el Frente de Pareto de cada algoritmo:  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAII}$ . Es decir, se agrupan las soluciones de todas las réplicas y se eliminan las dominadas con el fin de estipular una Frontera de Pareto para cada algoritmo.

Esto es lo que se puede observar para *Makespan vs. Mean Flow Time* en la Fig. 24 (*la01*), Fig. 25 (*la02*), Fig. 26 (*la03*), Fig. 27 (*la04*), Fig. 28 (*la05*), Fig. 29 (*la06*), Fig. 30 (*la07*), Fig. 31 (*la08*), Fig. 32 (*la09*) y Fig. 33 (*la10*), y para *Makespan vs. Delay* en la Fig. 34 (*la01*), Fig. 35 (*la02*), Fig. 36 (*la03*), Fig. 37 (*la04*), Fig. 38 (*la05*), Fig. 39 (*la06*), Fig. 40 (*la07*), Fig. 41 (*la08*), Fig. 42 (*la09*) y Fig. 43 (*la10*)

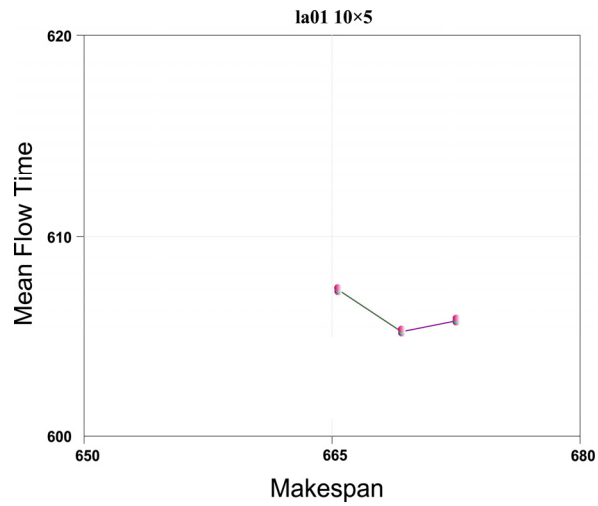


Fig. 24  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la01)

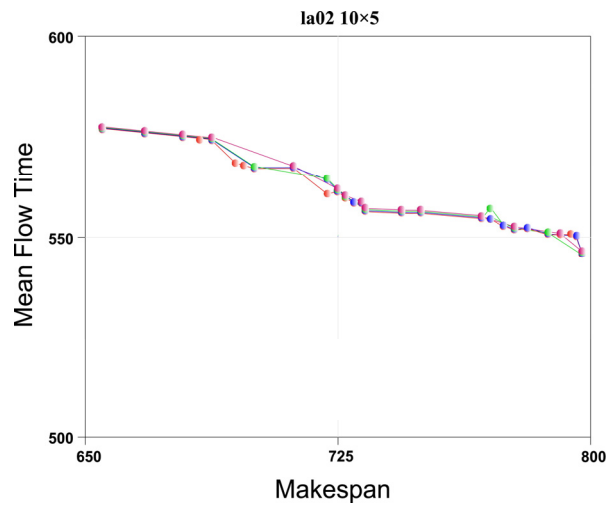


Fig. 25  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la02)

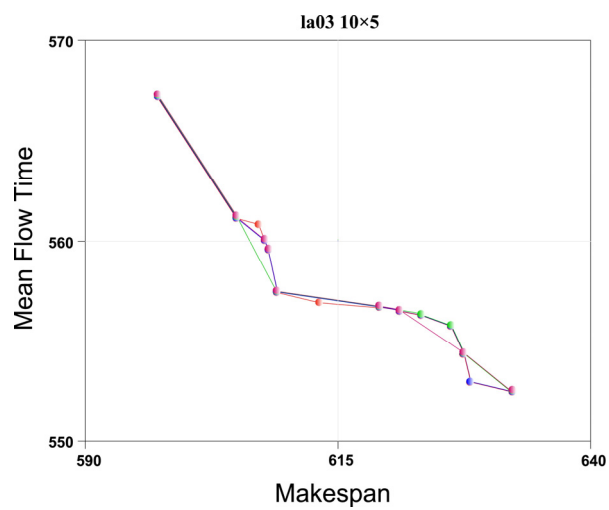


Fig. 26  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la03)

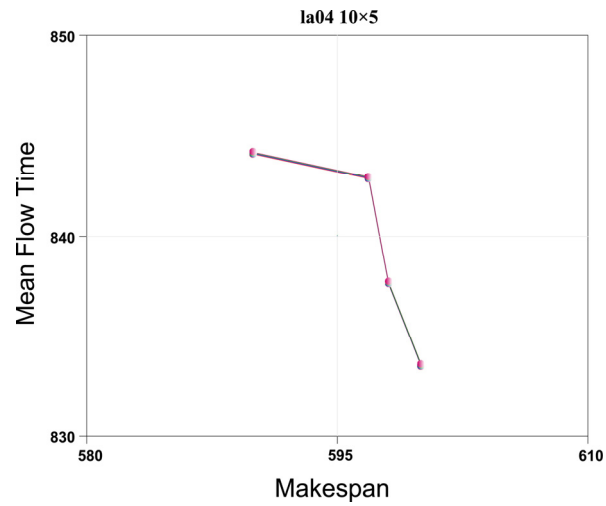


Fig. 27  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la04)

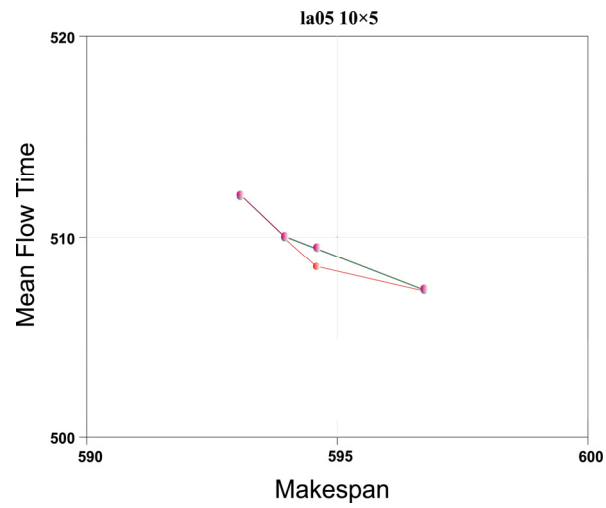


Fig. 28  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la05)

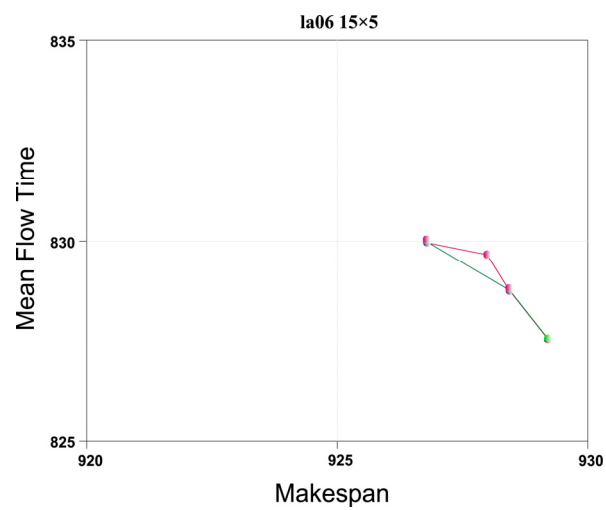


Fig. 29  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la06)

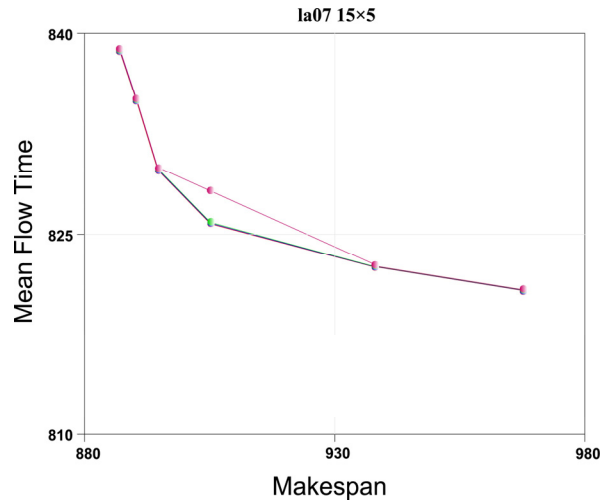


Fig. 30  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la07)

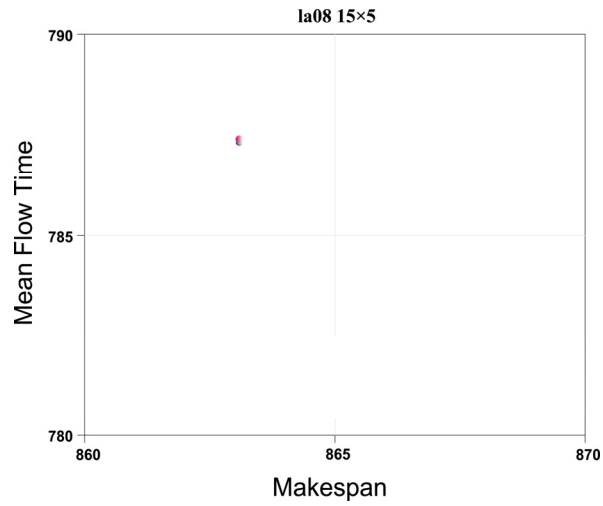


Fig. 31  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la08)

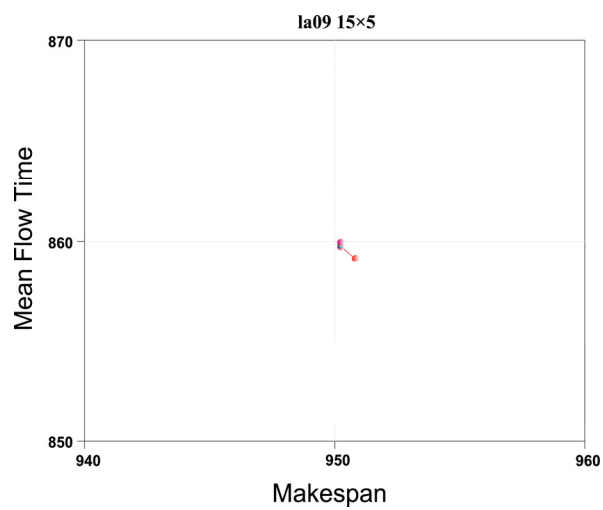


Fig. 32  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la09)

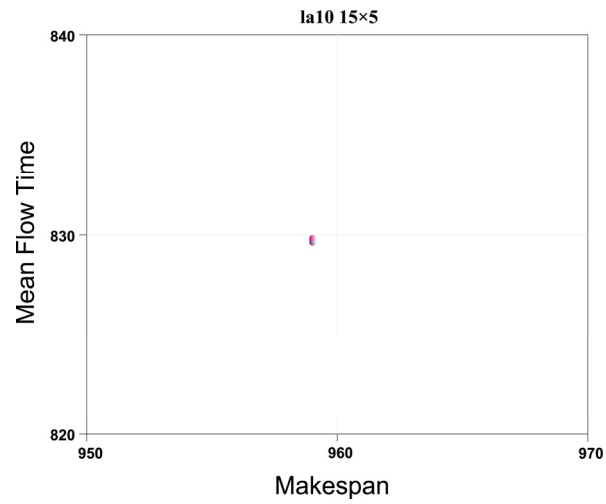


Fig. 33  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAII}$ , Makespan vs. Mean Flow Time (la10)

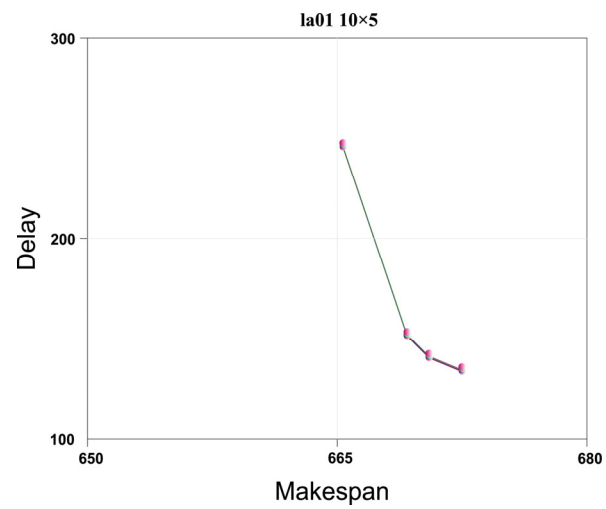


Fig. 34  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAII}$ , Makespan vs. Delay (la01)

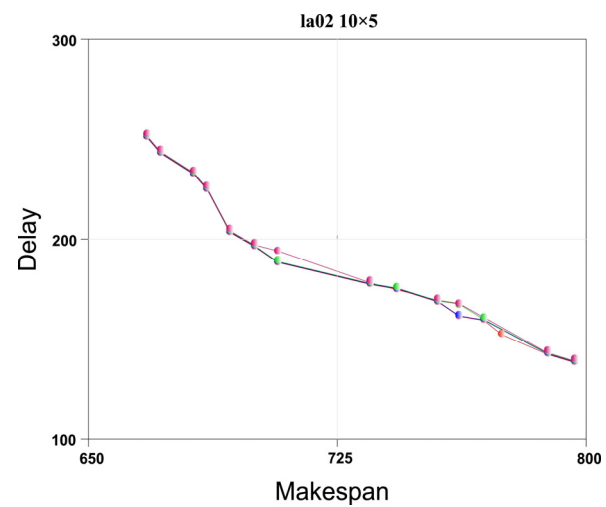


Fig. 35  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAII}$ , Makespan vs. Delay (la02)

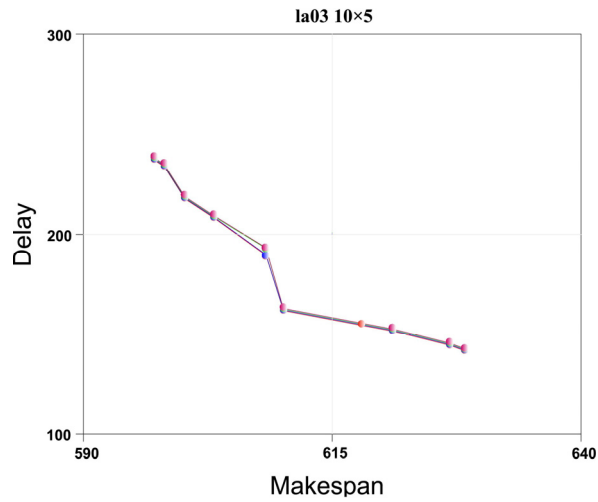


Fig. 36  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Delay (la03)

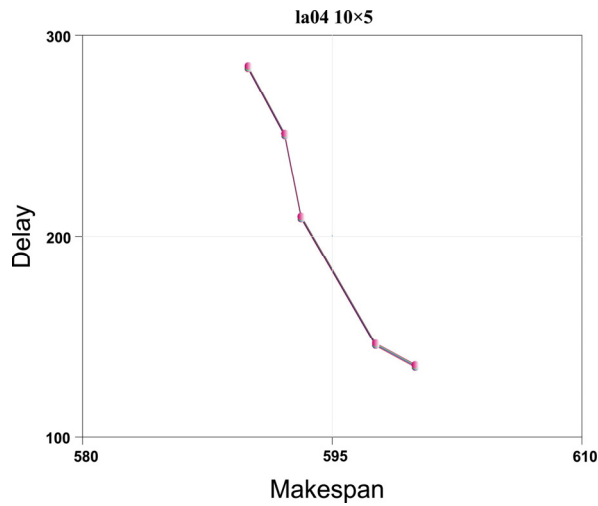


Fig. 37  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Delay (la04)

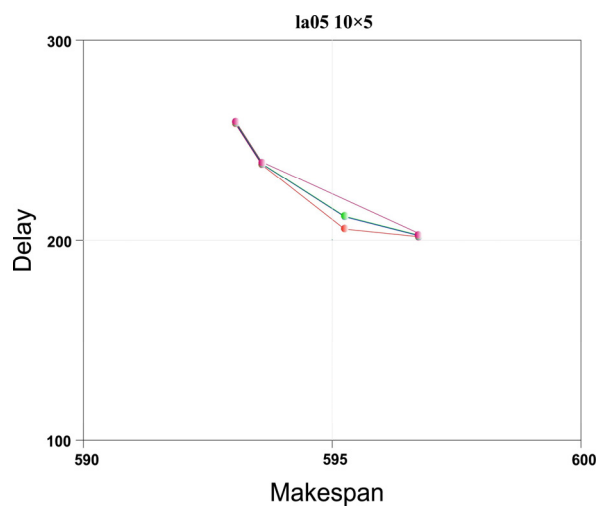


Fig. 38  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAI}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Delay (la05)

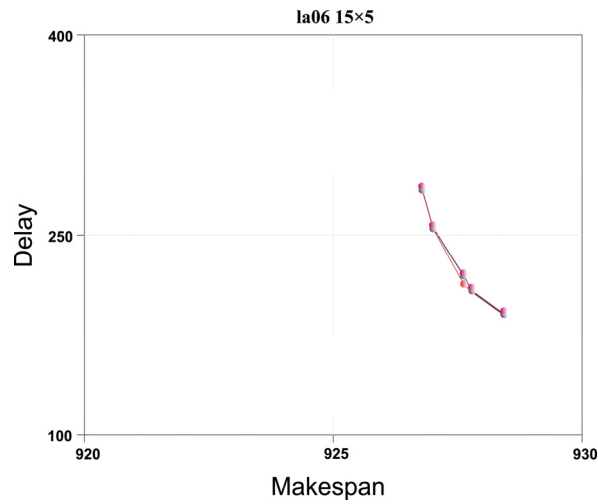


Fig. 39  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , *Makespan vs. Delay (la06)*

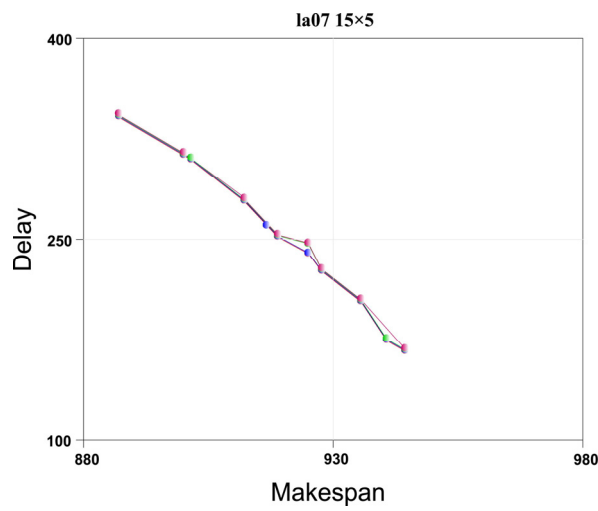


Fig. 40  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , *Makespan vs. Delay (la07)*

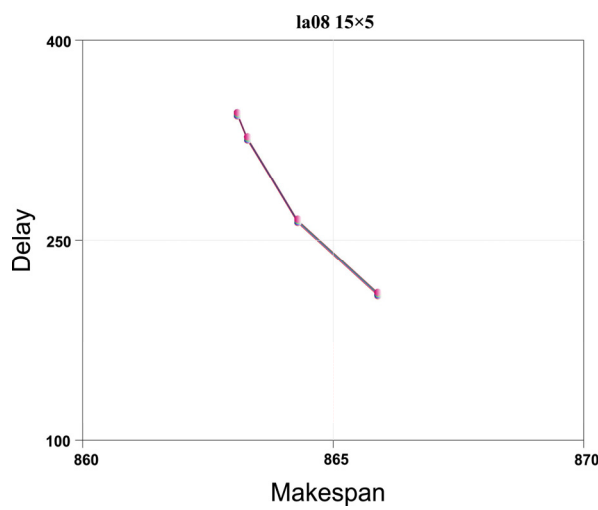


Fig. 41  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , *Makespan vs. Delay (la08)*



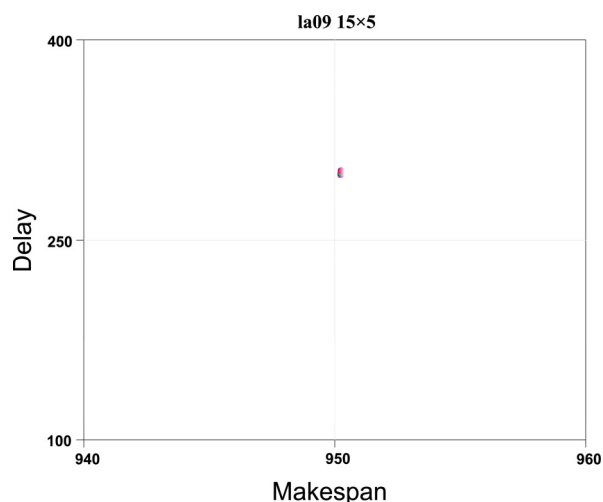


Fig. 42  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Delay (la09)

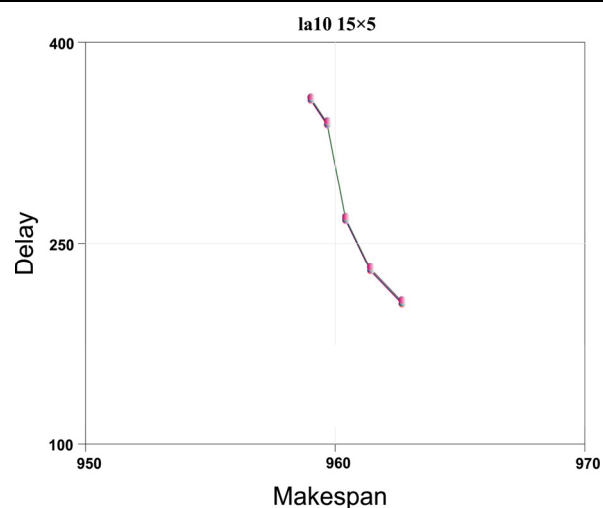


Fig. 43  $Y_{NSGA}$ ,  $Y_{SPEA}$ ,  $Y_{SPEAII}$  e  $Y_{(LS)NSGAI}$ , Makespan vs. Delay (la10)

## 4.2 PROCEDIMIENTO DE COMPARACIÓN

Para obtener una aproximación del Frente Pareto Óptimo  $\hat{Y}_{true}$ , se toma al conjunto de soluciones  $Y_{NSGA} \cup Y_{SPEA} \cup Y_{SPEAII} \cup Y_{(LS)NSGAI}$ , y se eliminan de él las soluciones dominadas. Para la comparación se tendrá en cuenta: la cantidad de soluciones de cada algoritmo que se encuentran en  $\hat{Y}_{true}$  ( $\in \hat{Y}_{true}$ ), la cantidad de soluciones que son dominadas por  $\hat{Y}_{true}$  ( $\hat{Y}_{true} \prec$ ), el número de soluciones encontradas por cada algoritmo ( $\hat{Y}_{alg}$ ) y el porcentaje de soluciones en  $\hat{Y}_{true}$  ( $\% \in \hat{Y}_{true}$ ). Además, se tendrá en cuenta la cantidad de soluciones de un algoritmo que dominan a las del otro algoritmo.

En primera instancia se compararon los diferentes algoritmos para el *Makespan vs. Mean Flow Time*. En los problemas *la01* (Tabla 14(a)), *la04* (Tabla 17(a)), *la08* (Tabla 21(a)) y *la10* (Tabla 23(a)), se puede apreciar que *NSGA*, *SPEA*, *SPEAII* y *(LS)NSGAI*, poseen el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . No existe dominancia de un algoritmo hacia otro (*la01* (Tabla 14(b)), *la04* (Tabla 17(b)), *la08* (Tabla 21(b)) y *la10* (Tabla 23(b))).

En el problema *la02* (Tabla 15(a)), se observa que *(LS)NSGAI* posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . Si bien *NSGA* tiene el 100% de efectividad, no tiene todas las soluciones de  $\hat{Y}_{true}$ . *SPEAII* alcanza un 90% de efectividad, ya que de un total de 21 soluciones, solo 2 de ellas son dominadas por  $\hat{Y}_{true}$ . *SPEA* no presenta gran eficiencia al abordar este problema. En la Tabla 15(b), se observa que *(LS)NSGAI* domina a *SPEA* en 2 soluciones y a *SPEAII* en 1 solución. Además, *SPEAII* domina a *SPEA* en 1 solución.

En el problema *la03* (Tabla 16(a)), *NSGA*, *SPEA*, *SPEAII* y *(LS)NSGAI* tienen el 100% de efectividad, pero solamente *(LS)NSGAI* tiene todas las soluciones de  $\hat{Y}_{true}$ . No existe dominancia de un algoritmo hacia otro (Tabla 16(b)).

En el problema *la05* (Tabla 18(a)), se observa que solo *(LS)NSGAI* posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . *(LS)NSGAI* domina en 1 solución al resto de los algoritmos (Tabla 18(b)).

En el problema *la06* (Tabla 19(a)), se observa que solo *(LS)NSGAI* posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . No existe dominancia de un algoritmo hacia otro (Tabla 19(b)).

En el problema *la07* (Tabla 20(a)), se puede apreciar que *SPEA*, *SPEAII* y *(LS)NSGAI* poseen el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . Se observa que estos algoritmos dominan a *NSGA* en 1 solución (Tabla 20(b)).

En el problema *la09* (Tabla 22(a)), *NSGA*, *SPEA*, *SPEAII* y *(LS)NSGAI* tienen el 100% de efectividad, pero solamente *(LS)NSGAI* tiene todas las soluciones de  $\hat{Y}_{true}$ . No existe dominancia de un algoritmo hacia otro (Tabla 22(b)).

**Tabla 14** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la01*)

<i>la01 10x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	3	0	3	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	3	0	3	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	3	0	3	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	3	0	3	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 15** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la02*)

<i>la02 10x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	15	0	15	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	13	2	15	86,6	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	27	0	27	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	2	-	1
$Y_{SPEAI}$	19	2	21	90	$Y_{SPEAI}$	0	1	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 16** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la03*)

<i>la03 10x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	9	0	9	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	8	0	8	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	14	0	14	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	12	0	12	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 17** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la04*)

<i>la04 10x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	4	0	4	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	4	0	4	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	4	0	4	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	4	0	4	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 18** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la05)

<i>la05 10x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	3	1	4	75	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	3	1	4	75	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	4	0	4	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	1	1	-	1
$Y_{SPEAI}$	3	1	4	75	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 19** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la06)

<i>la06 15x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	3	0	3	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	3	0	3	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	4	0	4	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	3	0	3	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 20** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la07)

<i>la07 15x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	5	1	6	83,3	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	6	0	6	100	$Y_{SPEA}$	1	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	6	0	6	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	1	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	6	0	6	100	$Y_{SPEAI}$	1	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 21** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la08)

<i>la08 15x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	1	0	1	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	1	0	1	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	1	0	1	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	1	0	1	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 22** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la09*)

<i>la09 15x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	1	0	1	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	1	0	1	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	2	0	2	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	1	0	1	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 23** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la10*)

<i>la10 15x5 / Makespan vs. Mean Flow Time</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	1	0	1	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	1	0	1	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	1	0	1	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	1	0	1	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

Seguido a esto, se compararon los diferentes algoritmos para el *Makespan vs. Delay*. En los problemas *la01* (Tabla 24(a)), *la04* (Tabla 27(a)), *la08* (Tabla 31(a)), *la09* (Tabla 32(a)) y *la10* (Tabla 33(a)), se puede apreciar que *NSGA*, *SPEA*, *SPEAI* y *(LS)NSGAI*, poseen el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . No existe dominancia de un algoritmo hacia otro (*la01* (Tabla 24(b)), *la04* (Tabla 27(b)), *la08* (Tabla 31(b)), *la09* (Tabla 32(a)) y *la10* (Tabla 33(b))).

En el problema *la02* (Tabla 25(a)), se observa que *(LS)NSGAI* posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . Si bien *SPEAI* tiene el 100% de efectividad, no tiene a todas las soluciones de  $\hat{Y}_{true}$ . *SPEA* alcanza un 92,8% de efectividad, ya que de un total de 14 soluciones, solo 1 de ellas es dominada por  $\hat{Y}_{true}$ . En la Tabla 25(b), se observa que *(LS)NSGAI* y *SPEAI* dominan a *NSGA* en 2 soluciones y a *SPEA* en 1 solución. Además, *SPEA* domina a *NSGA* en 1 solución.

En el problema *la03* (Tabla 26(a)), se observa que *(LS)NSGAI* posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . Si bien *SPEAI* tiene el 100% de efectividad, no tiene a todas las

soluciones de  $\hat{Y}_{true}$ . En la Tabla 26(b), se observa que  $(LS)NSGAI$  y  $SPEAI$  dominan a  $NSGA$  y a  $SPEA$  en 1 solución.

En el problema  $la05$  (Tabla 28(a)), se aprecia que  $(LS)NSGAI$  posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . Si bien  $NSGA$  tiene el 100% de efectividad, no tiene a todas las soluciones de  $\hat{Y}_{true}$ . En la Tabla 28(b), se observa que  $(LS)NSGAI$  domina a  $SPEA$  y a  $SPEAI$  en 1 solución.

En el problema  $la06$  (Tabla 29(a)), se observa que solo  $(LS)NSGAI$  posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . En la Tabla 29(b), se aprecia que  $(LS)NSGAI$  domina a  $NSGA$ , a  $SPEA$  y a  $SPEAI$  en 1 solución.

En el problema  $la07$  (Tabla 30(a)), se observa que  $SPEAI$  posee el 100% de sus soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . Si bien  $(LS)NSGAI$  tiene el 100% de efectividad, no tiene todas las soluciones de  $\hat{Y}_{true}$ . En la Tabla 30(b), se observa que  $(LS)NSGAI$  y  $SPEAI$  dominan a  $NSGA$  y a  $SPEA$  en 1 solución.

**Tabla 24** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos ( $la01$ )

<i>la01 10x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	4	0	4	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	4	0	4	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	4	0	4	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	4	0	4	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 25** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos ( $la02$ )

<i>la02 10x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	10	2	12	83,3	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	13	1	14	92,8	$Y_{SPEA}$	1	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	15	0	15	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	2	1	-	0
$Y_{SPEAI}$	14	0	14	100	$Y_{SPEAI}$	2	1	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 26** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la03*)

<i>la03 10x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	8	1	9	88,8	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	8	1	9	88,8	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	10	0	10	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	1	1	-	0
$Y_{SPEAI}$	9	0	9	100	$Y_{SPEAI}$	1	1	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 27** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la04*)

<i>la04 10x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	5	0	5	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	5	0	5	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	5	0	5	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	5	0	5	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 28** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la05*)

<i>la05 10x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	3	0	3	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	3	1	4	75	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	4	0	4	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	1	-	1
$Y_{SPEAI}$	3	1	4	75	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 29** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (*la06*)

<i>la06 15x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	4	1	5	80	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	4	1	5	80	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	5	0	5	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	1	1	-	1
$Y_{SPEAI}$	4	1	5	80	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 30** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la07)

<i>la07 15x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	7	1	8	87,5	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	9	1	10	90	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	10	0	10	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	1	1	-	0
$Y_{SPEAI}$	11	0	11	100	$Y_{SPEAI}$	1	1	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 31** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la08)

<i>la08 15x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	4	0	4	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	4	0	4	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	4	0	4	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	4	0	4	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 32** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la09)

<i>la09 15x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	1	0	1	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	1	0	1	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	1	0	1	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	1	0	1	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				

**Tabla 33** Comparación de las soluciones con  $\hat{Y}_{true}$  y análisis de dominancia de los algoritmos (la10)

<i>la10 15x5 / Makespan vs. Delay</i>									
	$\in \hat{Y}_{true}$	$\hat{Y}_{true} \prec$	$\hat{Y}_{alg}$	$\% \in \hat{Y}_{true}$		$Y_{NSGA}$	$Y_{SPEA}$	$Y_{(LS)NSGAI}$	$Y_{SPEAI}$
$Y_{NSGA}$	5	0	5	100	$Y_{NSGA}$	-	0	0	0
$Y_{SPEA}$	5	0	5	100	$Y_{SPEA}$	0	-	0	0
$Y_{(LS)NSGAI}$	5	0	5	100	$Y_{(LS)NSGAI}$	0	0	-	0
$Y_{SPEAI}$	5	0	5	100	$Y_{SPEAI}$	0	0	0	-
(a)					(b)				



### 4.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos con los distintos algoritmos evolutivos multi-objetivos (*MOEA*, *Multi-Objective Evolutionary Algorithm*) implementados. Se observa que *(LS)NSGAI* llega, en la mayoría de los casos, a todas las soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . También, *SPEAI* muestra muy buen desempeño. *NSGA* y *SPEA* son los algoritmos que alcanzan menor cantidad de soluciones en  $\hat{Y}_{true}$ . Esto muestra a *(LS)NSGAI* como la mejor alternativa, ya que supera a los otros algoritmos. Este tipo de comparación es muy simple y directo, lo que permitió evaluar la calidad de los procedimientos utilizados en este estudio.

## CAPÍTULO 5:

### EL MÉTODO MONTE CARLO APLICADO A CONFIGURACIONES *JOB-SHOP*

Los sistemas de producción son altamente concurrentes, presentando evoluciones paralelas y sincronización, exclusiones mutuas, y conflictos, que son típicos en entornos industriales. La simulación del sistema puede ser una herramienta muy potente y simple para determinar el comportamiento que presentará al operar bajo ciertas condiciones. Incluso una simulación permite comprobar con antelación cómo se van a realizar ciertas maniobras especiales, como por ejemplo la parada de alguna máquina, la modificación del proceso productivo, un cambio de los parámetros de producción, etc., sin necesidad de involucrar al sistema real, ni el costo y riesgo que ello origina.

Los modelos de simulación formulan los sistemas mediante variables aleatorias que representan la aparición de los eventos, lo cual conduce a una evolución del sistema en términos de probabilidad (Guasch et al. 2002). También, se considera la simulación como una herramienta para determinar propiedades del sistema, es decir, para estudiarlo y analizarlo. Las soluciones analíticas, especialmente para sistemas estocásticos, suelen ser demasiado complicadas de obtener, por lo que la simulación se presenta como una herramienta alternativa para ello (Banks et al. 2003). En este capítulo se presenta un análisis metodológico de la aplicación del método Monte Carlo para el modelado y simulación de los sistemas productivos con configuración tipo *Job-Shop*.

## 5.1 MÉTODO MONTE CARLO

El método Monte Carlo (*MC*) es una técnica de simulación de muestreo artificial empleada para operar numéricamente sistemas complejos que contengan componentes aleatorios o determinísticos. Los orígenes de esta técnica están ligados al proceso sistemático del método desarrollado por Stan Ulam y John Von Neumann por el año 1944. Alrededor de 1970, los desarrollos teóricos en complejidad computacional comienzan a proveer mayor precisión con el empleo de este método. En años posteriores, se ha venido aplicando en una infinidad de ámbitos (informática, empresarial, económica, industrial, social, entre otros), como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones. En otras palabras, el método *MC* está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental. Precisamente, el nombre Monte Carlo proviene de la famosa ciudad de Mónaco, donde abundan los casinos de juego y donde el azar, la probabilidad y el comportamiento aleatorio conforman todo un estilo de vida. El método es aplicable a cualquier tipo de problema. Para el *MC*, el objeto de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio se usa para estudiar el modelo. A veces la aplicación del método *MC* se usa para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito (Ajmone et al. 1995). En estos casos un parámetro determinista del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula para analizar el sistema. No se debe confundir este método con un proceso de optimización. En optimización, las variables son las salidas del proceso, a las cuales se le busca calcular el valor óptimo, por el contrario, en el método *MC* u otro tipo de simulación dichas variables constituyen las entradas del mismo. El modelo puede evaluar a través de la simulación distintas situaciones para una misma solución supuestamente óptima. Son muchos los autores que han apostado por utilizar la simulación que propone el método *MC* (Camm y Evans 1996, Winston y Albright 1997, Casal et al. 2005, entre otros) (Fig. 44).

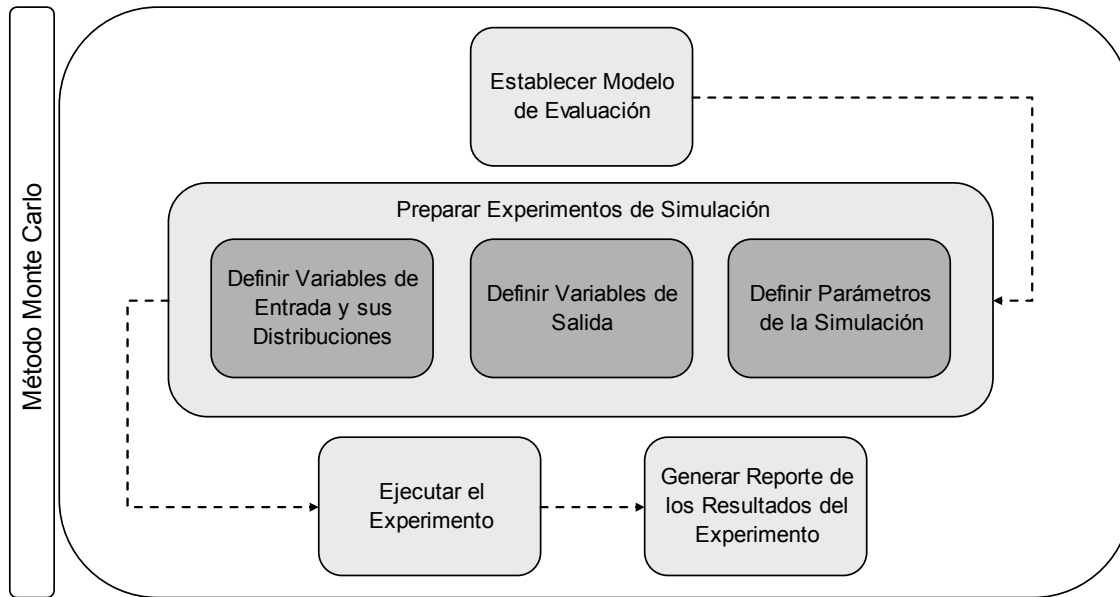


Fig. 44 Método Monte Carlo

## 5.2 PREPARACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Un sistema de producción con configuración *Job-Shop* se compone de varios procesos diferentes sincronizados. Estos procesos de estado discreto en tiempo continuo pueden ser muy difíciles de caracterizar y casi imposibles de analizar en un caso general. Esta caracterización y análisis se vuelven razonablemente simples al aplicar el método *MC*. Este método reduce la dimensión del modelo al incrementar el nivel de abstracción. Con esto, se amplía la capacidad de condensación del modelo, lo que permitirá evaluar la eficiencia del sistema, analizando fácilmente las propiedades de prestaciones de respuesta del mismo. El análisis de estas propiedades permite obtener rápidamente conclusiones importantes sobre la evolución del sistema (Guasch et al. 2002). Para poder aplicar el método, es necesario definir valores que varíen siguiendo algún tipo de distribución. En nuestro caso, solo se cuenta con valores fijos de los tiempos de procesamiento ( $\tau_{ij}^k$ ) de cada operación, por lo que se asignara a cada uno de ellos una distribución de probabilidades a modo de poder analizar el comportamiento de cada configuración. Se estableció, para todos los tiempos, la distribución

normal ya que presenta un comportamiento general y de fácil parametrización. Se asigna un valor medio igual a  $\tau_{ij}^k$  y un desvío estándar entre el 5 y el 10 % de este de manera aleatoria. Se construyeron escenarios en los cuales se considero los efectos de estas variaciones. Una vez definidas las variables de entrada y los parámetros de las distribuciones normales que se aplicaron a las mismas, el siguiente paso es definir la variable de salida. Para nuestro caso esta variable se corresponderá con el *Makespan* (Fig. 45, Ejemplo presentado en Tabla 2 con  $\pi_1: 1, 4$  y  $8$ ,  $\pi_2: 2, 6$  y  $7$ , y  $\pi_3: 3, 5$  y  $9$ ).

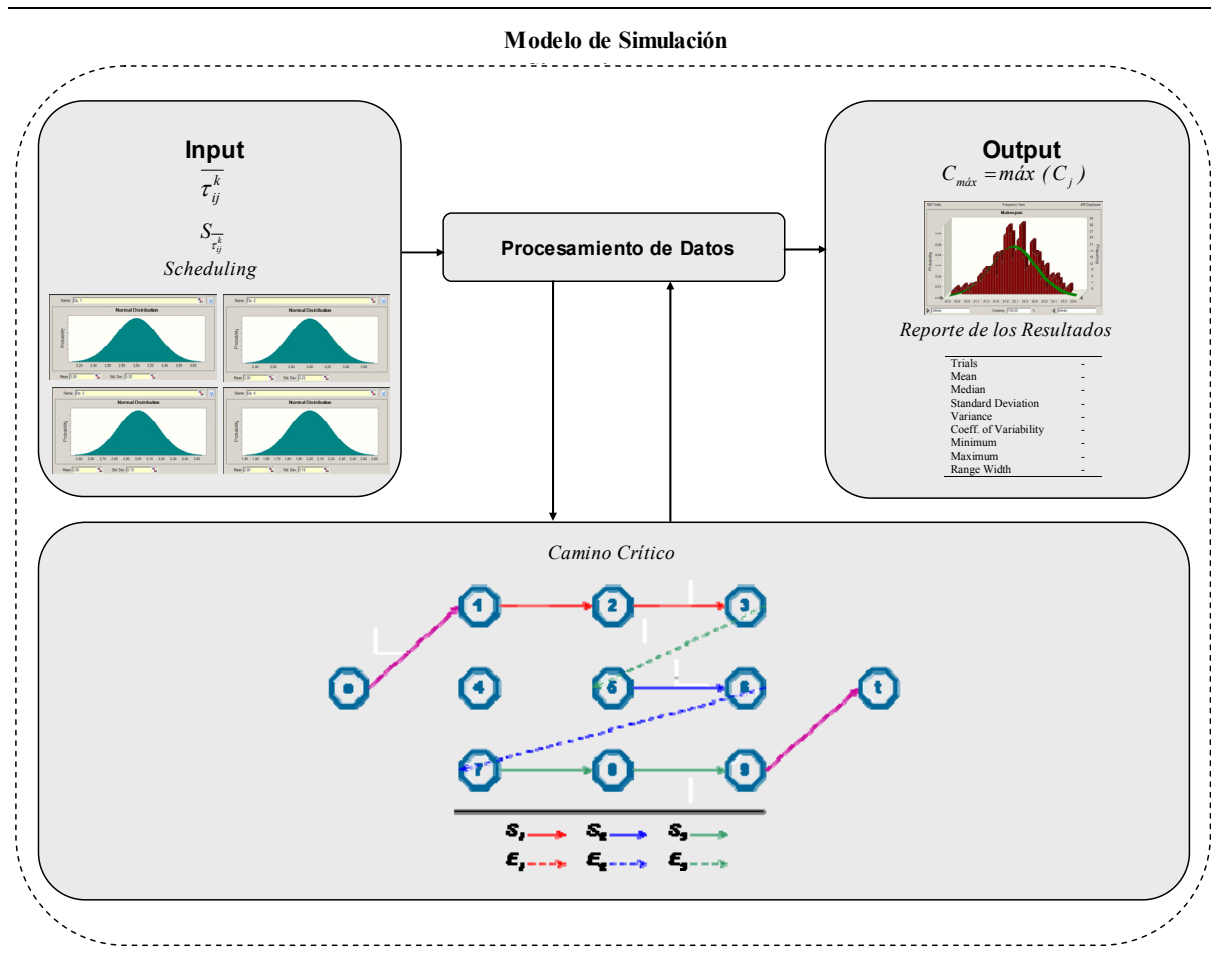


Fig. 45 Modelo de Simulación

El modelo se desarrollo sobre *MS-Excel*. Este software posee una gran facilidad de uso, capacidad para recalcular valores y, sobre todo, da la posibilidad de analizar escenarios *what-if analysis*. Las últimas versiones de *MS-Excel* incorporan, además, un lenguaje de

programación propio, el *Visual Basic for Applications*, con el cual es posible crear auténticas aplicaciones de simulación destinadas al usuario final. En el mercado existen varios complementos de *MS-Excel (Add-Ins)* específicamente diseñados para aplicar el método *MC*, siendo el más conocido *Crystall Ball*.

En la práctica, las pruebas aleatorias se sustituyen por resultados realizados con números aleatorios. Luego de la simulación se obtuvo el siguiente reporte para el ejemplo presentado: Trials 500, Mean 21.97, Median 21.95, Standard Deviation 0.59, Variance 0.35, Coeff. of Variability 0.0269, Minimum 20.40, Maximum 23.72 y Range Width 3.32 (Ver de Fig. 46).

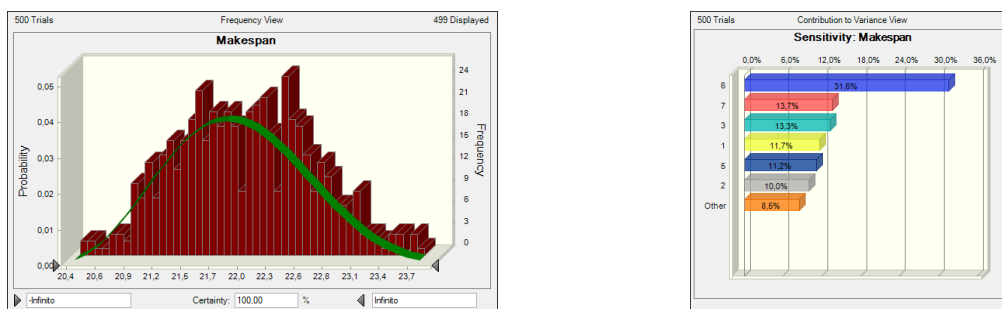
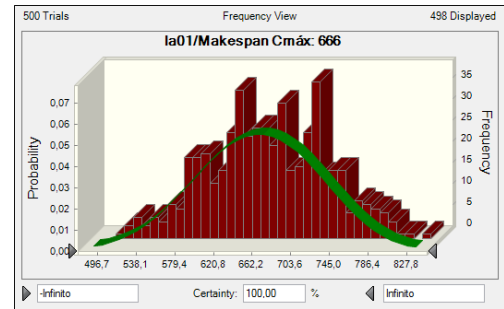


Fig. 46 Distribución de probabilidades del *Makespan* (Ejemplo)

### 5.3 EXPERIENCIAS REALIZADAS

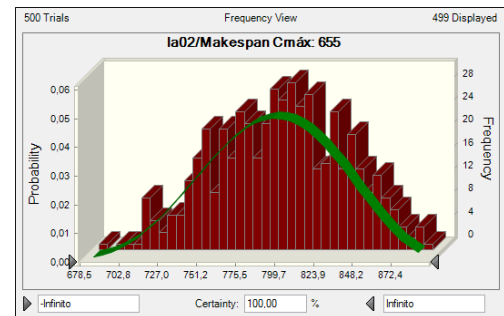
Se corrió el modelo realizando 500 réplicas para comenzar a analizar el sistema. Un incremento en el número de réplicas solo contribuye a afinar ligeramente los resultados, ya que la tendencia general se mantiene. Se han presentado diferentes niveles de detalle de los modelos para obtener resultados específicos. Las restricciones lógicas entre los recursos (máquinas) y las operaciones, junto con sus relaciones temporales y de precedencia son algunos de los elementos claves que fueron formalizados en este modelo como una secuencia de eventos. Todo esto es aplicado a los casos abordados en el capítulo anterior para tratar de proporcionar un enfoque metodológico de la utilización del método *MC* (Ver de Fig. 47 a Fig. 56).

Trials	500
Mean	663,74
Median	662,44
Standard Deviation	57,19
Variance	3.270,65
Coeff. of Variability	0,0862
Minimum	534,84
Maximum	794,62
Range Width	259,78



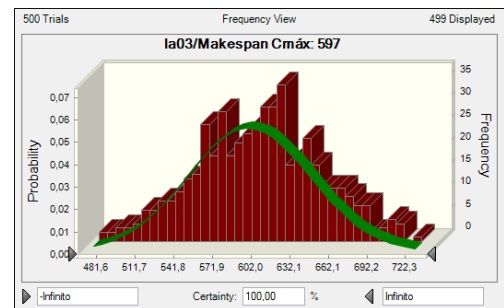
**Fig. 47** Distribución de probabilidades del *Makespan (la01)*

Trials	500
Mean	656,96
Median	655,50
Standard Deviation	22,08
Variance	487,39
Coeff. of Variability	0,0336
Minimum	564,83
Maximum	733,74
Range Width	168,90



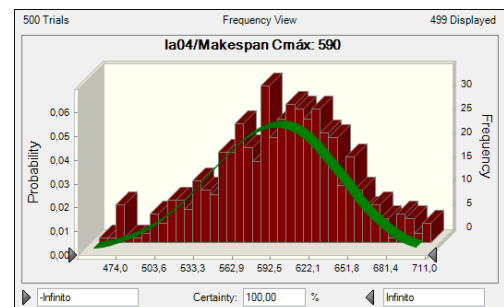
**Fig. 48** Distribución de probabilidades del *Makespan (la02)*

Trials	500
Mean	656,96
Median	655,50
Standard Deviation	22,08
Variance	487,39
Coeff. of Variability	0,0336
Minimum	564,83
Maximum	733,74
Range Width	168,90



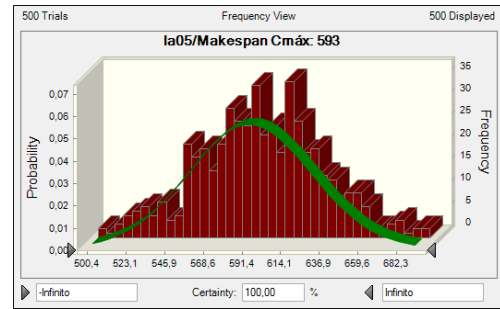
**Fig. 49** Distribución de probabilidades del *Makespan (la03)*

Trials	500
Mean	590,77
Median	590,34
Standard Deviation	47,17
Variance	2.224,85
Coeff. of Variability	0,0798
Minimum	474,45
Maximum	703,76
Range Width	229,31



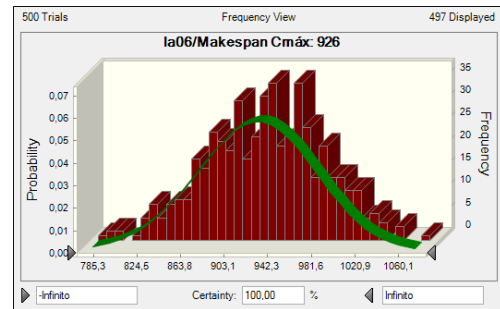
**Fig. 50** Distribución de probabilidades del *Makespan (la04)*

Trials	500
Mean	593,22
Median	593,02
Standard Deviation	34,64
Variance	1.200,17
Coeff. of Variability	0,0584
Minimum	489,77
Maximum	703,95
Range Width	214,18



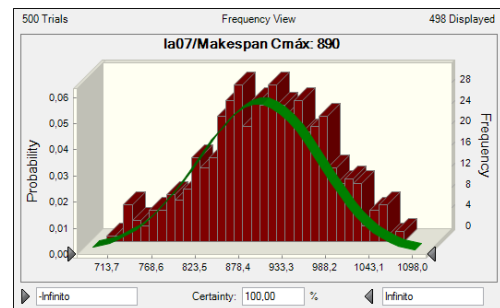
**Fig. 51** Distribución de probabilidades del *Makespan (la05)*

Trials	500
Mean	925,20
Median	926,09
Standard Deviation	54,85
Variance	3.009,04
Coeff. of Variability	0,0593
Minimum	766,52
Maximum	1.135,91
Range Width	369,39



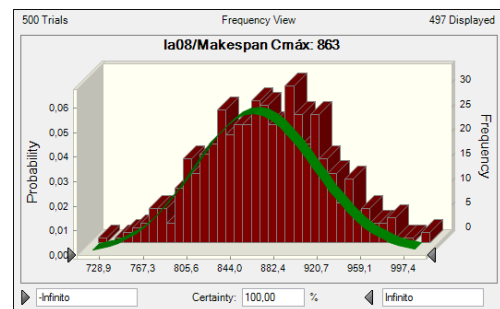
**Fig. 52** Distribución de probabilidades del *Makespan (la06)*

Trials	500
Mean	886,69
Median	890,35
Standard Deviation	75,81
Variance	5.747,40
Coeff. of Variability	0,0855
Minimum	717,99
Maximum	1.059,38
Range Width	341,39



**Fig. 53** Distribución de probabilidades del *Makespan (la07)*

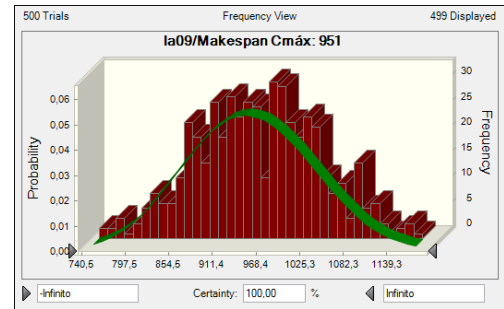
Trials	500
Mean	864,98
Median	863,12
Standard Deviation	50,19
Variance	2.519,46
Coeff. of Variability	0,0580
Minimum	682,98
Maximum	1.039,38
Range Width	356,41



**Fig. 54** Distribución de probabilidades del *Makespan (la08)*

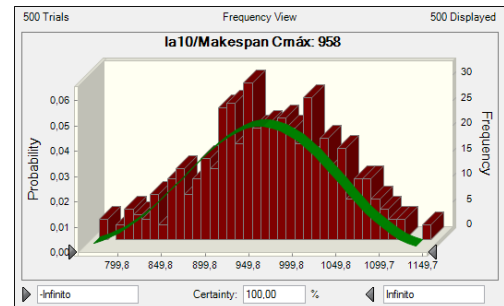


Trials	500
Mean	946,45
Median	947,98
Standard Deviation	77,94
Variance	6.075,05
Coeff. of Variability	0,0824
Minimum	771,98
Maximum	1.130,31
Range Width	358,34



**Fig. 55** Distribución de probabilidades del *Makespan (la09)*

Trials	500
Mean	953,36
Median	948,44
Standard Deviation	75,96
Variance	5.770,43
Coeff. of Variability	0,0797
Minimum	774,61
Maximum	500
Range Width	953,36



**Fig. 56** Distribución de probabilidades del *Makespan (la10)*

Los diferentes experimentos de simulación brindaron información adicional lo que permitió un estudio con mayor grado de detalle. Algo que se debe tener en cuenta en el análisis es la forma que adquiere la curva de distribución de probabilidades. Para alguno de los experimentos se observa claramente que existe una alta probabilidad que el camino crítico cambie según el valor que se le asigne al tiempo de procesamiento de cada una de las operaciones. Esto se manifiesta, por ejemplo para los problemas *la01*, *la03* y *la10*, en la generación de varios picos que dificultan percibir el valor medio, y en el problema *la09*, se aprecia una densidad de probabilidades similar en la parte media. Analizar este comportamiento es importante al momento de asignar recursos para mejorar el sistema productivo.

Los experimentos de simulación complementaron el procedimiento evolutivo logrando aumentar el grado de conocimiento que se tiene de cada una de las programaciones obtenidas y de esta manera tener mayor control sobre el proceso (Fig. 57).

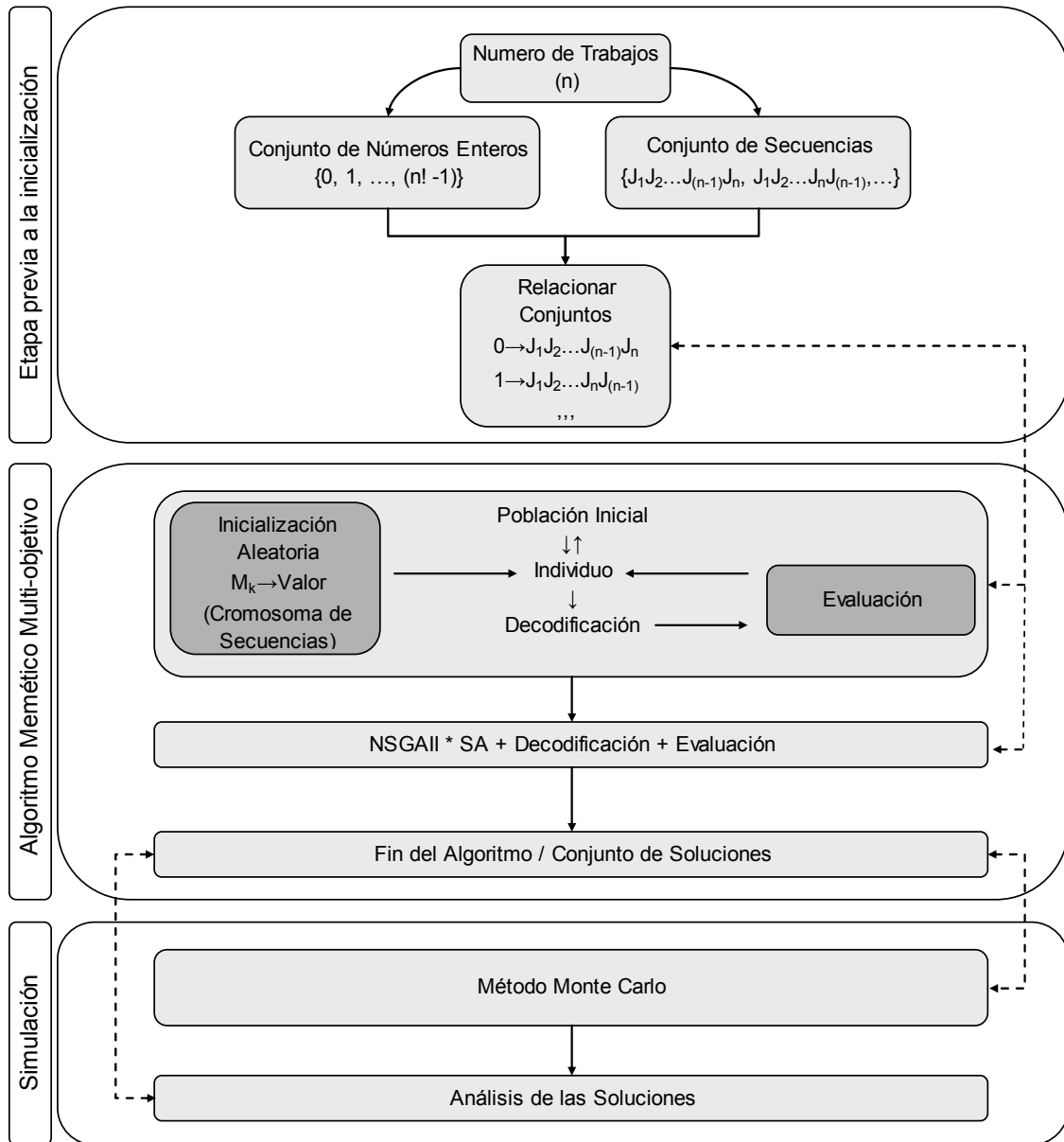


Fig. 57 Esquema General del Procedimiento

Además, poder analizar un conjunto de soluciones obtenidas para un mismo problema, permite reordenar, y en algunos casos filtrar aquellas soluciones que ante un mismo valor en los objetivos planteados poseen una mayor variabilidad. Por esta razón, se adicionaron ensayos donde se experimento con todas las programaciones obtenidas para cada uno de los problemas resueltos. Los resultados de estos ensayos se presentan gráficamente de Fig. 58 a Fig. 67. A modo de comprender las figuras, el diámetro de las burbujas establece la variabilidad que presenta cada programación.

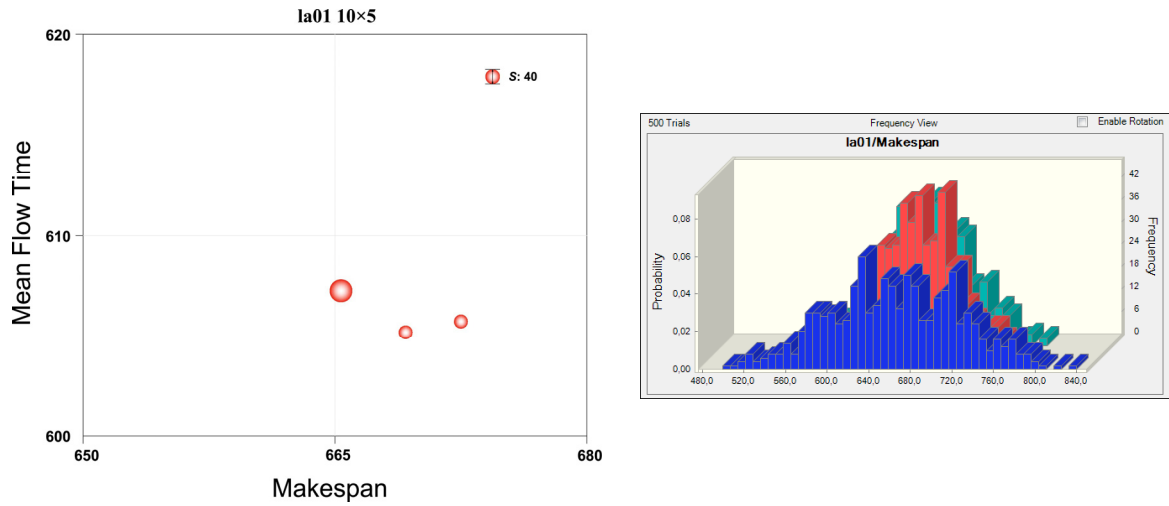


Fig. 58 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la01*)

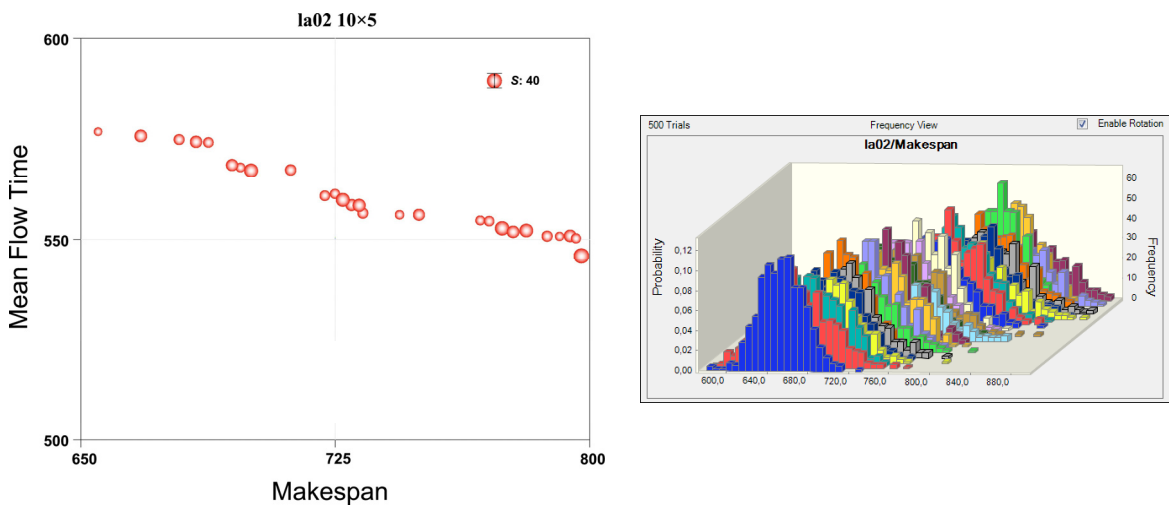


Fig. 59 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la02*)

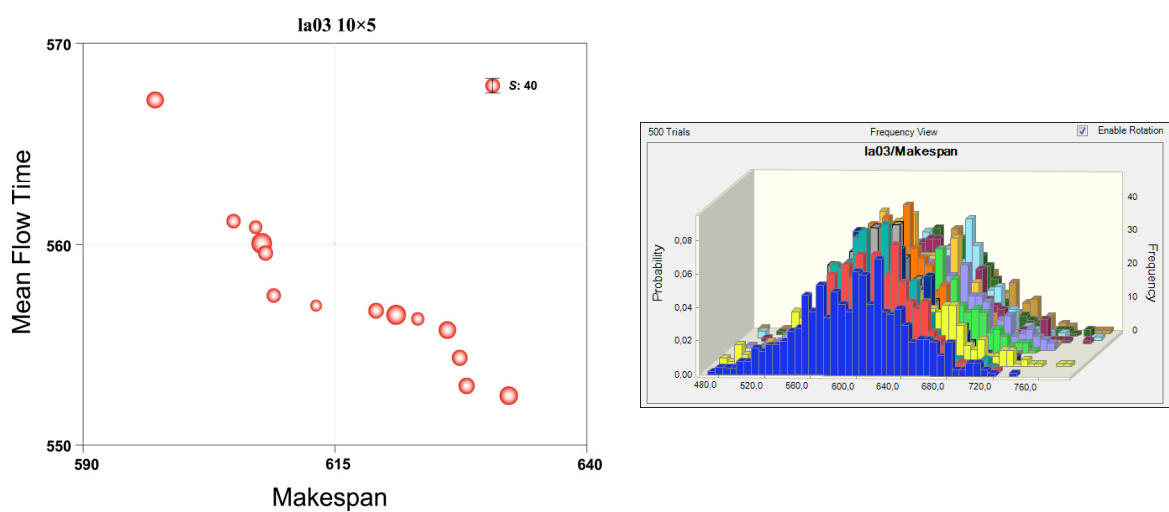
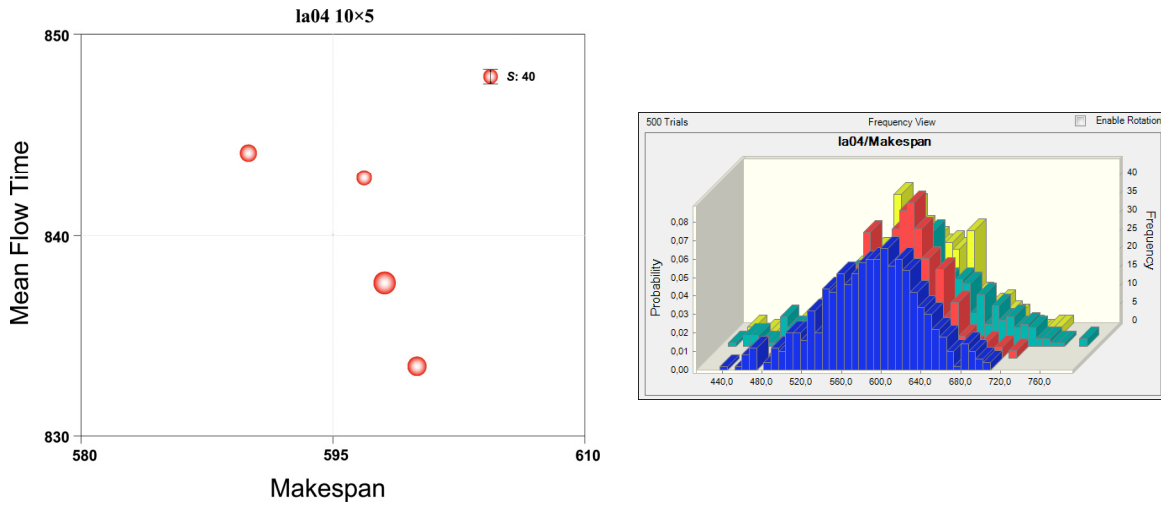
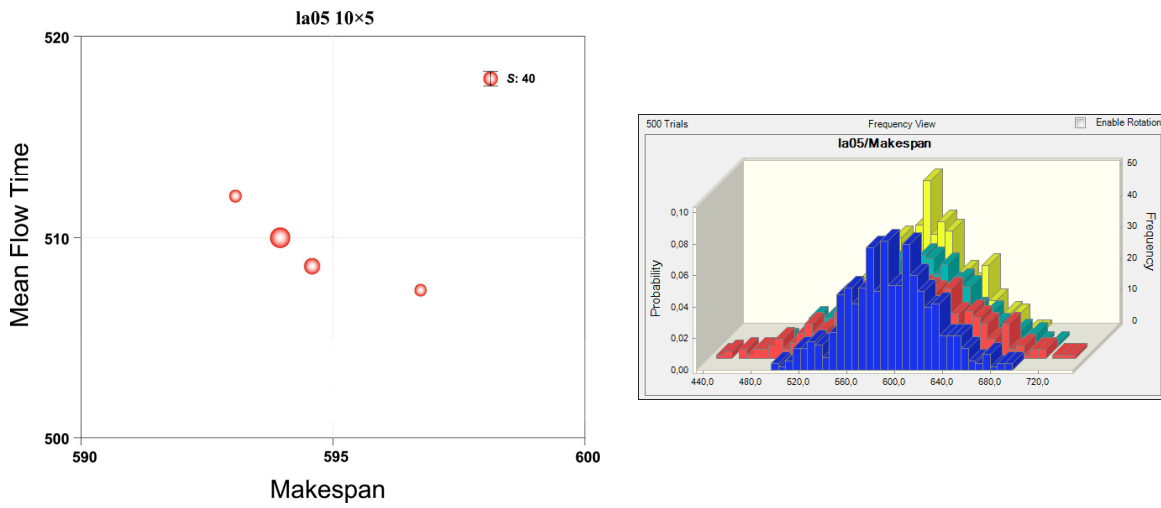


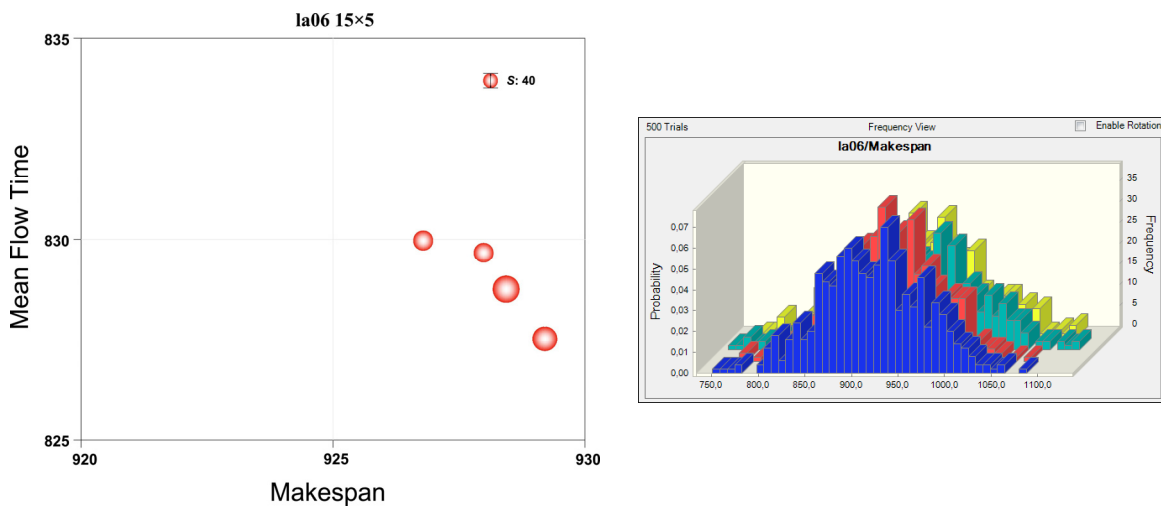
Fig. 60 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la03*)



**Fig. 61** Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la04*)



**Fig. 62** Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la05*)



**Fig. 63** Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la06*)

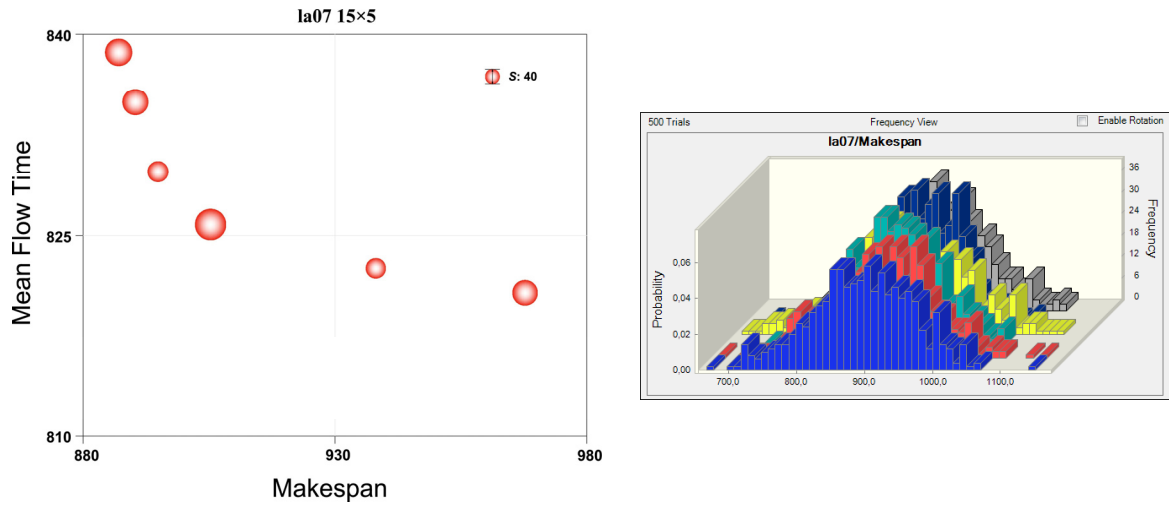


Fig. 64 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la07*)

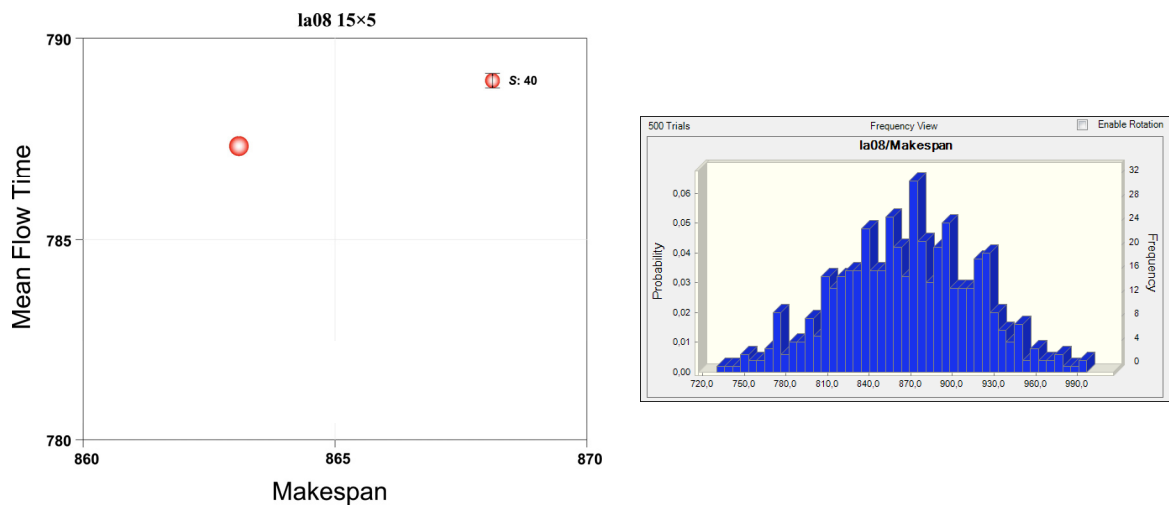


Fig. 65 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la08*)

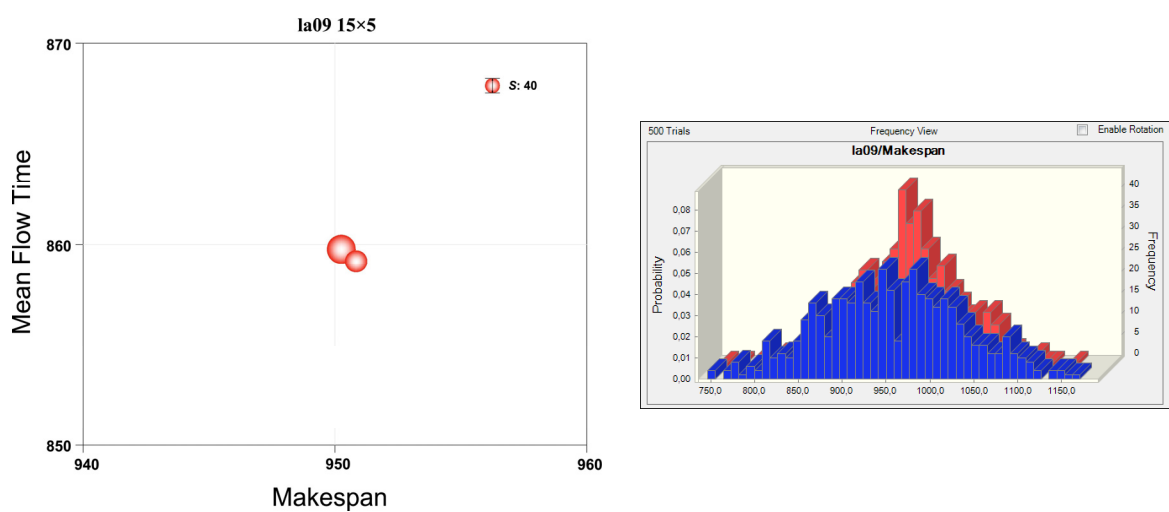
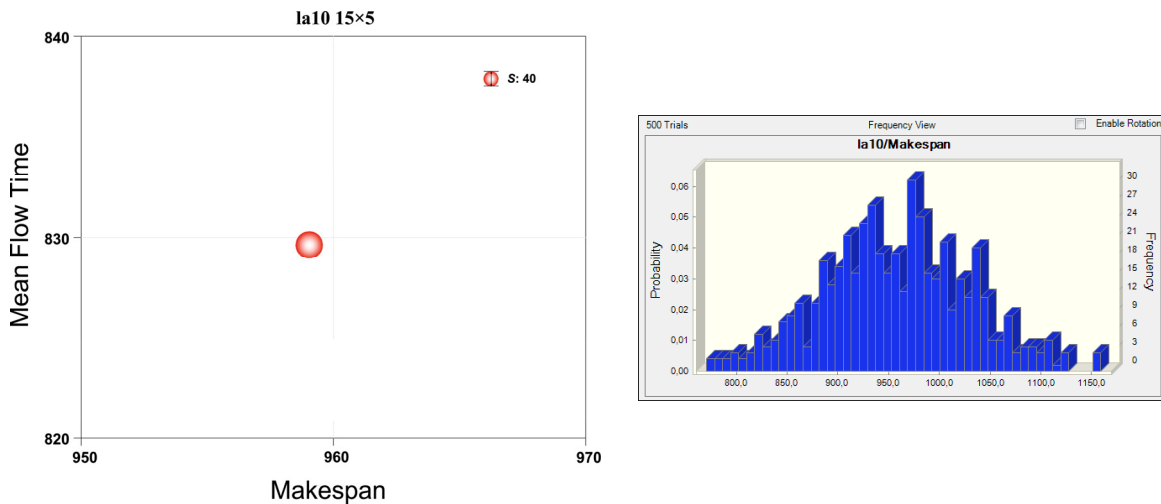


Fig. 66 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la09*)



**Fig. 67** Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (*la10*)

La complejidad y gran dimensión son características importantes de los sistemas productivos mencionados, y parte de las razones por las que el método *MC* constituye una herramienta muy útil para modelarlos. La versatilidad de este método hace que sea apropiado para incorporar modelos de diferentes escalas. La aplicación y la interpretación de sus resultados deben realizarse con precaución. La utilización de *Crystal Ball* ha probado ser útil a la hora de proveer una gran cantidad de escenarios posibles que permitieron un estudio más amplio de las posibles programaciones de operaciones analizadas para las distintas configuraciones productivas.

## 5.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentaron las principales características del método Monte Carlo aplicado a las diferentes programaciones para las distintas configuraciones productivas tipo *Job-Shop* resueltas en el capítulo anterior. En la actualidad existen otras técnicas de simulación que ofrecen herramientas de modelado para describir un determinado nivel de abstracción estableciendo las distintas relaciones entre operaciones, procesos, recursos, condiciones y tiempos o estados del sistema. La combinación de la optimización y la simulación como herramienta de análisis, es un enfoque atractivo ya que intenta tomar ventaja del potencial combinado de estas dos metodologías.

## CAPÍTULO 6:

### APLICACIONES

A modo de ilustrar el procedimiento general se realizaron distintas aplicaciones. Las mismas tendrán lugar en empresas de diferentes rubros. Debido a las condiciones operativas que presentó cada una de ellas, fue necesario establecer pautas generales de desarrollo. Los distintos pasos del algoritmo se adaptaron a las diferentes condiciones, y en algunos casos, se plantearon nuevas restricciones.

Por cuestiones de confidencialidad, lo cual fue establecido por todas las empresas visitadas, se describió el proceso de manera general y se resolvió sin dar especificaciones técnicas de los distintos productos que realizan las mismas. Fue autorizado por las empresas mostrar diferentes imágenes, las cuales indican el contexto laboral en el cual se encuentra inmersa cada una de ellas. Cada empresa presentó expedientes técnicos los cuales constan de un conjunto de documentos en los cuales se encuentran el diseño (planos) y las especificaciones del producto a producir (dimensiones de las piezas, proceso productivo, etc.). Los documentos principales que conforman este expediente son: dibujo técnico, planos constructivos, listado de piezas y despiece, accesorios y otras características, así como el flujo de producción representado por un diagrama de operaciones.

La información del expediente permitió planificar y organizar la aplicación. Contar con esta información fue de mucha importancia, teniendo en cuenta que estas empresas funcionan bajo una configuración productiva tipo *Job-Shop*.

## **6.1 CASO A: PRODUCTOS DE MADERA CON TERMINACIÓN EN LACA**

El primer caso a resolver se refiere a la elaboración de productos de madera. Luego de analizar las características del sistema productivo que posee la empresa, se concluyó que sigue la configuración estudiada en la presente tesis por lo que se efectuara la aplicación del procedimiento desarrollado sobre la misma (Fig. 68).

En el proceso productivo intervienen personas con ciertas habilidades y conocimientos, usando herramientas y maquinarias para transformar la madera en un producto final. En general, la elaboración de un producto de madera posee las siguientes fases: habilitado, maquinado, ensamble y acabado. A continuación se hará una descripción general del proceso.

El habilitado es la primera fase en la fabricación de un producto de madera, y tiene el propósito de transformar la materia prima en tablas con medidas específicas. Los distintos cortes para la producción de cada una de las partes del producto lo determinan sus especificaciones técnicas. La primera operación del habilitado es el trozado. Esta operación transforma la materia prima en tablas. Se procede al corte en sentido transversal, y así conseguir las medidas aproximadas de las piezas del producto a fabricar. Luego se realiza el cepillado. Esta es la operación del habilitado en la que se nivelan las caras y los cantos de las tablas. Se busca que las superficies sean rectas en dirección longitudinal y transversal. En esta operación se obtienen medidas exactas del largo, ancho y espesor de la tabla.

La siguiente fase, en el proceso, es el maquinado. Este consiste en la realización de un conjunto de operaciones con la finalidad de dar forma y características específicas a las piezas para el ensamble o armado del producto. El maquinado consiste en la realización de cortes y desbastado de las tablas y partes habilitadas hasta conseguir su forma final utilizando diferentes tipos de máquina según los cortes y formas que se requieren. El corte de piezas curvas se realiza aprovechando la flexibilidad de la hoja sin fin o sierra cinta de carpintería.





Fig. 68 Caso A: Productos de madera con terminación en laca





Fig. 68 Caso A: Productos de madera con terminación en laca (Continuación)

Dependiendo del espesor de la madera y de la curvatura del corte, variara el ancho a emplear de la sierra. En ella pueden hacerse cortes de cualquier longitud y en cualquier dirección. Siempre se deben cortar piezas demás como resguardo por si alguna pieza en el lote esta defectuosa. Otra operación que se realiza en el maquinado es el perfilado o moldurado. Esta se utiliza para realizar diferentes tipos de ensambles, molduras, contra molduras, machihembrados, etc. La fresadora, es la máquina que se utiliza para realizar este tipo de operación. Uno de los ensambles que se realiza con mayor frecuencia es la unión denominada caja y espiga. El labrado de la madera lo realiza una broca con movimiento oscilante y horizontal combinado con el movimiento de desplazamiento de la mesa. Las medidas de la espiga, se calibran en espesor y ancho variable según el diseño de la pieza, guardando relación con las medidas de la ranura o caja.

La siguiente fase es el ensamble. Este consiste en unir las piezas habilitadas y maquinadas, encajando las partes salientes de una en las entrantes de otra. También el ensamble puede ser a través de la unión de dos piezas. Antes de realizar esta operación, se ejecuta el lijado para eliminar fibras levantadas, rayados, rugosidades o huellas del maquinado en las superficies. El lijado es la operación que va a definir el aspecto estético del producto de madera. Este permite presentar una superficie plana y uniforme. Condiciona la apariencia y calidad final del acabado. De acuerdo a las propiedades de la madera, se elegirá el tipo de lija para realizar el primer lijado de las piezas de la superficie para el acabado. Las lijas a utilizar deben estar definida en el esquema de lijado. En el ensamble o armado, se realizan diferentes operaciones de acuerdo a la estructura y tipo de juntas o ensambles. Ordenar las piezas a unir, chequear que todas las piezas están clasificadas, completas y sin defectos. El ensamble puede realizarse utilizando diferentes tipos de uniones: caja y espiga, media madera, tarugo, cola de milano, entre otras. El tipo de uniones deberá estar definido en el expediente técnico. Por último, el acabado comprende el laqueado dando así la finalización del proceso de elaboración del producto.

El caso permite establecer la utilización de 7 máquinas y/o centros de trabajo ( $M_1$ : trozado,  $M_2$ : cepillado,  $M_3$ : corte,  $M_4$ : perfilado,  $M_5$ : lijado,  $M_6$ : ensamblado,  $M_7$ : laqueado). Además, el estudio se centra en la elaboración de 5 productos diferentes. El diagrama de flujo que representa el proceso de cada producto se muestra en Fig. 69.

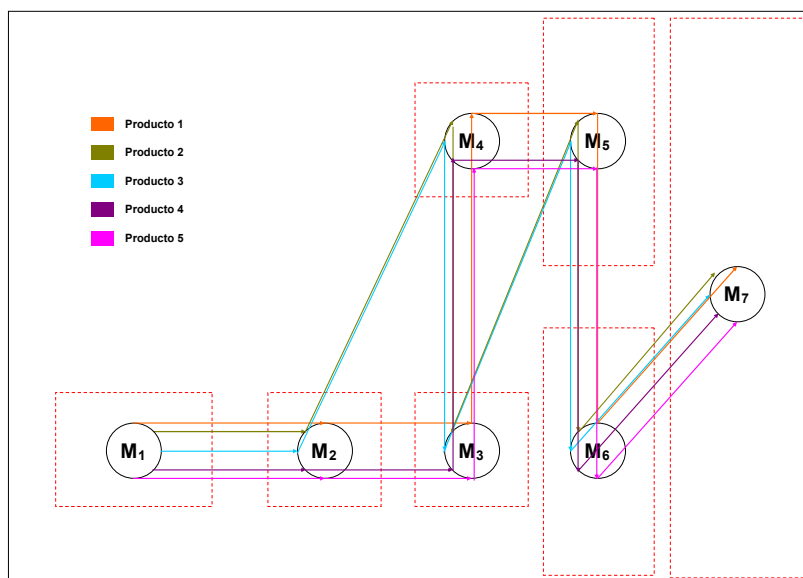


Fig. 69 Caso A: Productos de madera con terminación en laca (*lay-out*)

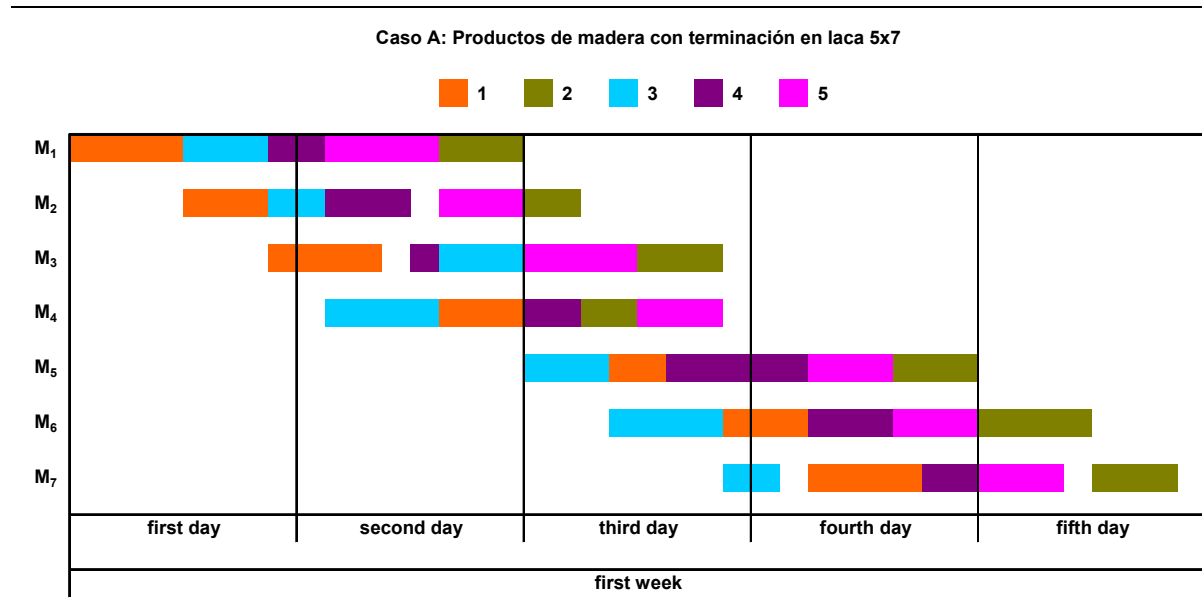
Existen puntos específicos en el proceso donde puede ser controlado el deterioro de los materiales. Su identificación permite eliminar o reducir los riesgos a niveles aceptables.

Se presenta en la Tabla 34 los datos del problema referidos a este caso de estudio. La información brindada establece la máquina  $M_k$  y/o centro de trabajo donde se realiza cada operación, y el tiempo de procesamiento ( $\tau_{ij}^k$ ) y su desvío estándar ( $S_{ij}^k$ ) en horas para esta última.

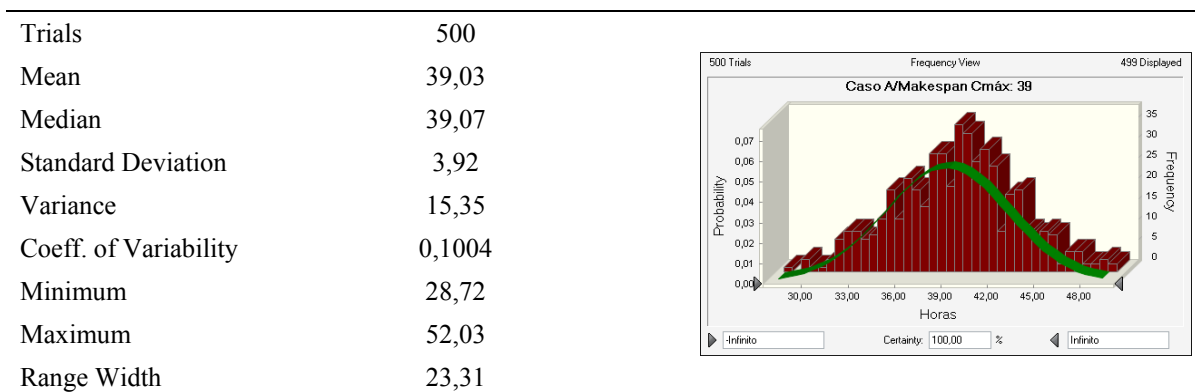
Tabla 34 Datos iniciales del *Job-Shop Scheduling Problem* (Caso: A)

$J_i$	$O_{1j}^k$			$O_{2j}^k$			$O_{3j}^k$			$O_{4j}^k$			$O_{5j}^k$			$O_{6j}^k$			$O_{7j}^k$		
	$M_k$	$\tau_{1j}^k$	$S_{1j}^k$	$M_k$	$\tau_{2j}^k$	$S_{2j}^k$	$M_k$	$\tau_{3j}^k$	$S_{3j}^k$	$M_k$	$\tau_{4j}^k$	$S_{4j}^k$	$M_k$	$\tau_{5j}^k$	$S_{5j}^k$	$M_k$	$\tau_{6j}^k$	$S_{6j}^k$	$M_k$	$\tau_{7j}^k$	$S_{7j}^k$
$J_1$	$M_1$	4	0,25	$M_2$	3	0,15	$M_3$	4	0,30	$M_4$	3	0,15	$M_5$	2	0,10	$M_6$	3	0,20	$M_7$	4	0,25
$J_2$	$M_1$	3	0,20	$M_2$	2	0,15	$M_4$	2	0,10	$M_3$	3	0,20	$M_5$	3	0,15	$M_6$	4	0,20	$M_7$	3	0,15
$J_3$	$M_1$	3	0,15	$M_2$	2	0,10	$M_4$	4	0,20	$M_3$	3	0,15	$M_5$	3	0,15	$M_6$	4	0,25	$M_7$	2	0,10
$J_4$	$M_1$	2	0,10	$M_2$	3	0,15	$M_3$	1	0,10	$M_4$	2	0,10	$M_5$	5	0,30	$M_6$	3	0,20	$M_7$	2	0,15
$J_5$	$M_1$	4	0,25	$M_2$	3	0,15	$M_3$	4	0,20	$M_4$	3	0,15	$M_5$	3	0,15	$M_6$	3	0,25	$M_7$	3	0,20

Luego de ejecutar *(LS)NSGAI*, se obtuvo una programación con un valor para el *Makespan* que mejoró lo ya definido por la empresa. En la Fig. 70 se muestra lo resuelto observando que la producción se culmina en el lapso de 39 horas. Además, en la Fig. 71, se brinda información referida al experimento de simulación realizado para esta programación.



**Fig. 70** Caso A: Productos de madera con terminación en laca (*scheduling*)



**Fig. 71** Distribución de probabilidades del *Makespan* (Caso: A)

Con respecto al conjunto de las soluciones obtenidas (Fig. 72), las mismas presentan diferentes intervalos operativos ((1;  $C_{m\acute{a}x}$ : 39,0;  $\bar{F}$  : 25,6), (2;  $C_{m\acute{a}x}$ : 41,0;  $\bar{F}$  : 24,6) (3;  $C_{m\acute{a}x}$ : 42,0;  $\bar{F}$  : 23,2) (4;  $C_{m\acute{a}x}$ : 45,0;  $\bar{F}$  : 22,8) (5;  $C_{m\acute{a}x}$ : 47,0;  $\bar{F}$  : 22,2) (6;  $C_{m\acute{a}x}$ : 48,0;  $\bar{F}$  : 21,8) (7;  $C_{m\acute{a}x}$ : 51,0;  $\bar{F}$  : 21,2) (8;  $C_{m\acute{a}x}$ : 52,0;  $\bar{F}$  : 21,0)). Estos intervalos van de 39 a 52 horas, lo que posibilita el análisis con respecto al otro objetivo involucrado. El *Mean Flow Time* se reduce

de 25,6 a 21 horas (18 %). Por ejemplo, si se pasa de la primera a la tercera solución del conjunto se observa un aumento *Makespan* del 7,8 %, reduciendo el *Mean Flow Time* en un 9,4 %. Se recuerda que esta reducción implica una disminución del inventario en proceso lo que involucra bajar el riesgo de deterioro de los materiales.

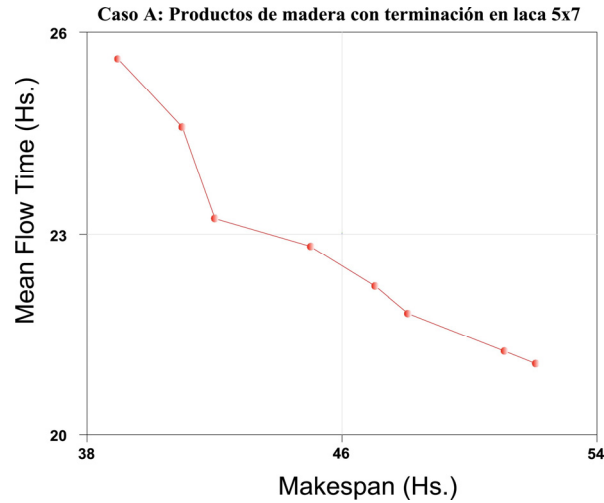


Fig. 72 *Makespan vs. Mean Flow Time* (Caso: A)

En la Fig. 73 se brinda información referida a los experimentos de simulación realizado sobre todo el conjunto de soluciones ((1; *S*: 3,92), (2; *S*: 1,72), (3; *S*: 2,31), (4; *S*: 2,71), (5; *S*: 3,83), (6; *S*: 2,41), (7; *S*: 3,02), (8; *S*: 1,35)). Se observa que la primera solución posee el mayor desvío estándar. Esto debe ser tenido en cuenta al decidir por una determinada programación.

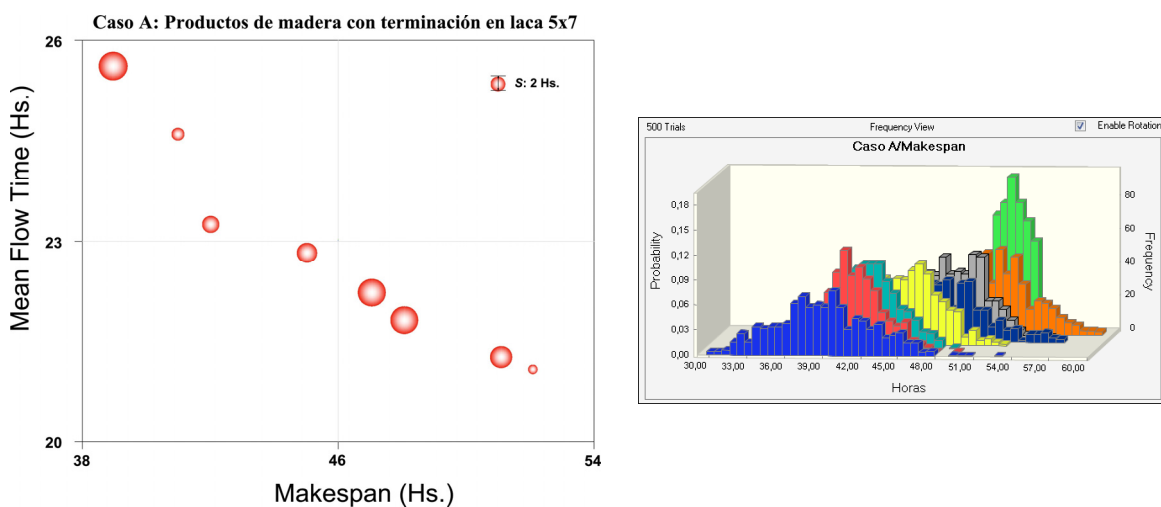


Fig. 73 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (Caso: A)

## **6.1 CASO B: PRODUCTOS PRE-FABRICADOS DE HORMIGÓN**

El segundo caso a resolver se refiere a la elaboración de productos pre-fabricados de hormigón. Esta empresa también sigue con la configuración estudiada en la presente tesis por lo que se efectuara la aplicación del procedimiento desarrollado sobre la misma (Fig. 74). A diferencia de la anterior, esta empresa posee dos tipos de producción. La primera, la cual posee mayor prioridad, es la producción estandarizada (vigas, columnas, pórticos, placas alveolares, bovedillas, casetones, tubos, postes eléctricos, gradas, etc.). En segundo lugar, y objeto de este estudio, es la producción no estandarizada (fogones, bancos de jardín, fuentes, escaleras, etc.). Sobre esta última se volcara la aplicación cuya disponibilidad de máquinas y/o centros de trabajos dependerá de la asignación ya establecida de las mismas a la producción estandarizada. A continuación se hará una descripción general del proceso.

El diseño y armado de los moldes es la primera fase en la elaboración de un producto pre-fabricado de hormigón. La primera operación de esta fase es la confección de los moldes. Los materiales para elaborar los mismos pueden ser maderas, planchas de acero, plásticos, cartón plastificado, entre otros. El material a utilizar dependerá de la forma y terminación que debe presentar el producto final. Seguido a esto se confecciona la estructura interna de acero cuyo objetivo es darle firmeza y rigidez a la pieza a modelar. Antes de montar la estructura en el molde se procede a la colocación de productos de desmolde (aceites). Una vez montada la estructura en el interior del molde se esta en condiciones de pasar a la siguiente fase.

La segunda fase, es la preparación y vertido del mortero. En primera instancia, se procede a la elaboración de la mezcla que conformara el hormigón. Para ello es necesario contar con arena, piedra partida, cemento y aditivos específicos. Estos últimos dependerán de las características físicas y mecánicas de cada producto. Luego, se vierte esta mezcla sobre los moldes. Para ello se colocan los moldes sobre mesas vibratoras para una correcta distribución y compactación del material evitando la existencia de partículas de aire en el moldeado.





Fig. 74 Caso B: Productos pre-fabricados de hormigón





Fig. 74 Caso B: Productos pre-fabricados de hormigón (Continuación)

Finalizada esta operación se deja fraguar durante 25 horas. Luego, se desmoldan las piezas manualmente y se sumergen en piletas de agua para su curado. Este proceso permite mejorar la calidad de la pieza.

En la tercera fase, el ensamble y acabado, se realizan diferentes operaciones de acuerdo a la estructura del producto. Antes de ensamblar, se debe chequear que todas las piezas a unir estén completas y sin defectos. En la mayoría de los casos el ensamble se realiza utilizando una mezcla liviana. El tipo de uniones deberá estar definido en el expediente técnico. En algunos casos se realizan estructuras externas de aceros para el montaje final del producto. El acabado comprende el pintado de las piezas ya ensambladas dando así la finalización del proceso de elaboración del producto.

El caso permite establecer la utilización de 5 máquinas y/o centros de trabajo ( $M_1$ : diseño y armado de los moldes,  $M_2$ : preparación y vertido del mortero,  $M_3$ : desmolde y curado de las piezas,  $M_4$ : ensamble,  $M_5$ : acabado). Además, el estudio se centra en la elaboración de 7 productos diferentes. El diagrama de flujo que representa el proceso de cada producto se muestra en Fig. 75.

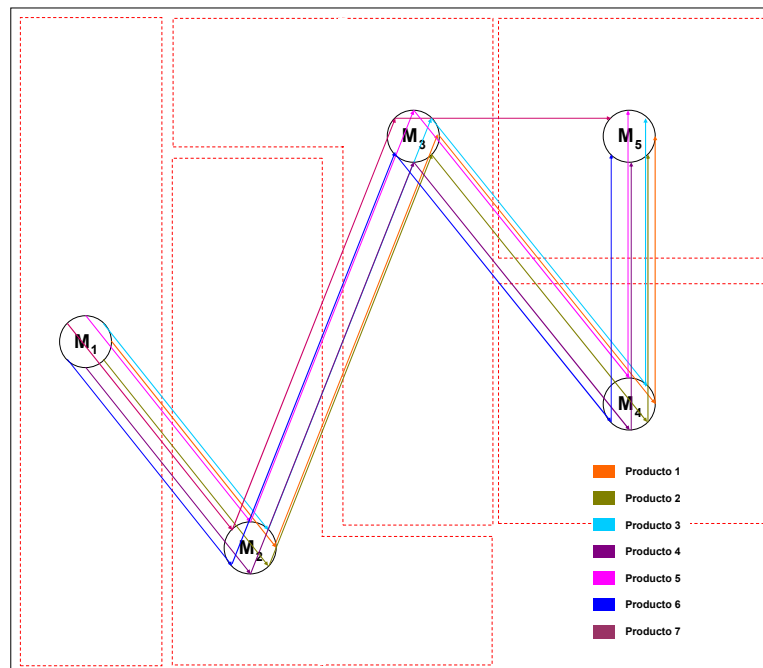


Fig. 75 Caso B: Productos pre-fabricados de hormigón (*lay-out*)

Gracias a estas técnicas de producción las propiedades mecánicas están garantizadas. La optimización de los métodos de compactación y curado confieren a los elementos excelentes propiedades en acabados, resistencia y durabilidad en comparación con otras formas de construcción tradicional.

Se presenta en la Tabla 35 los datos del problema referidos a este caso de estudio. La información brindada establece la máquina  $M_k$  y/o centro de trabajo donde se realiza cada operación, y el tiempo de procesamiento ( $\tau_{ij}^k$ ) y su desvío estándar ( $S_{ij}^k$ ) en horas para esta última.

**Tabla 35** Datos iniciales del *Job-Shop Scheduling Problem* (Caso: B)

$J_i$	$O_{1j}^k$			$O_{2j}^k$			$O_{3j}^k$			$O_{4j}^k$			$O_{5j}^k$		
	$M_k$	$\tau_{1j}^k$	$S_{1j}^k$	$M_k$	$\tau_{2j}^k$	$S_{2j}^k$	$M_k$	$\tau_{3j}^k$	$S_{3j}^k$	$M_k$	$\tau_{4j}^k$	$S_{4j}^k$	$M_k$	$\tau_{5j}^k$	$S_{5j}^k$
$J_1$	$M_1$	2	0,20	$M_2$	2	0,15	$M_3$	2	0,05	$M_4$	2	0,20	$M_5$	1	0,05
$J_2$	$M_1$	2	0,15	$M_2$	2	0,20	$M_3$	2	0,05	$M_4$	3	0,30	$M_5$	2	0,10
$J_3$	$M_1$	3	0,25	$M_2$	2	0,15	$M_3$	2	0,05	$M_4$	3	0,35	$M_5$	2	0,10
$J_4$	$M_1$	2	0,20	$M_2$	3	0,25	$M_3$	2	0,05	$M_4$	3	0,30	$M_5$	2	0,10
$J_5$	$M_1$	3	0,25	$M_2$	4	0,30	$M_3$	3	0,10	$M_4$	2	0,15	$M_5$	1	0,05
$J_6$	$M_1$	4	0,30	$M_2$	3	0,20	$M_3$	3	0,10	$M_4$	2	0,20	$M_5$	1	0,05
$J_7$	$M_1$	3	0,20	$M_2$	2	0,15	$M_3$	3	0,10	$M_4$	0	0,00	$M_5$	1	0,05

Luego de ejecutar *(LS)NSGAI*, se obtuvo una programación con un valor para el *Makespan* de 51 horas (Fig. 76). Se aprecia en la figura que se respeta en esta programación las restricciones de asignación de las máquinas y/o centros de trabajo a la producción estandarizada. Además, en la Fig. 77, se brinda información referida al experimento de simulación realizado para esta programación. Al analizar la distribución de probabilidades presentada se observa que no se ajusta a lo esperado. La forma que adopta esta distribución se debe a que se satisfacen las restricciones propuestas referidas a las disponibilidades de las máquinas y/o centros de trabajos.

Con respecto al conjunto de las soluciones obtenidas (Fig. 78), las mismas presentan diferentes intervalos operativos ((1;  $C_{máx}$ : 51,0;  $\bar{F}$  : 19,71), (2;  $C_{máx}$ : 55,0;  $\bar{F}$  : 19,43) (3;  $C_{máx}$ :

57,0;  $\bar{F}$  : 19,28) (4;  $C_{m\acute{a}x}$ : 58,0;  $\bar{F}$  : 19,14)). Estos intervalos van de 51 a 58 horas, lo que posibilita el análisis con respecto al otro objetivo involucrado. El *Mean Flow Time* se reduce de 19,71 a 19,14 horas (2,89 %). Por ejemplo, si se pasa de la primera a la segunda solución del conjunto se observa un aumento del *Makespan* del 7,8 %, reduciendo el *Mean Flow Time* en un 1,4 %.

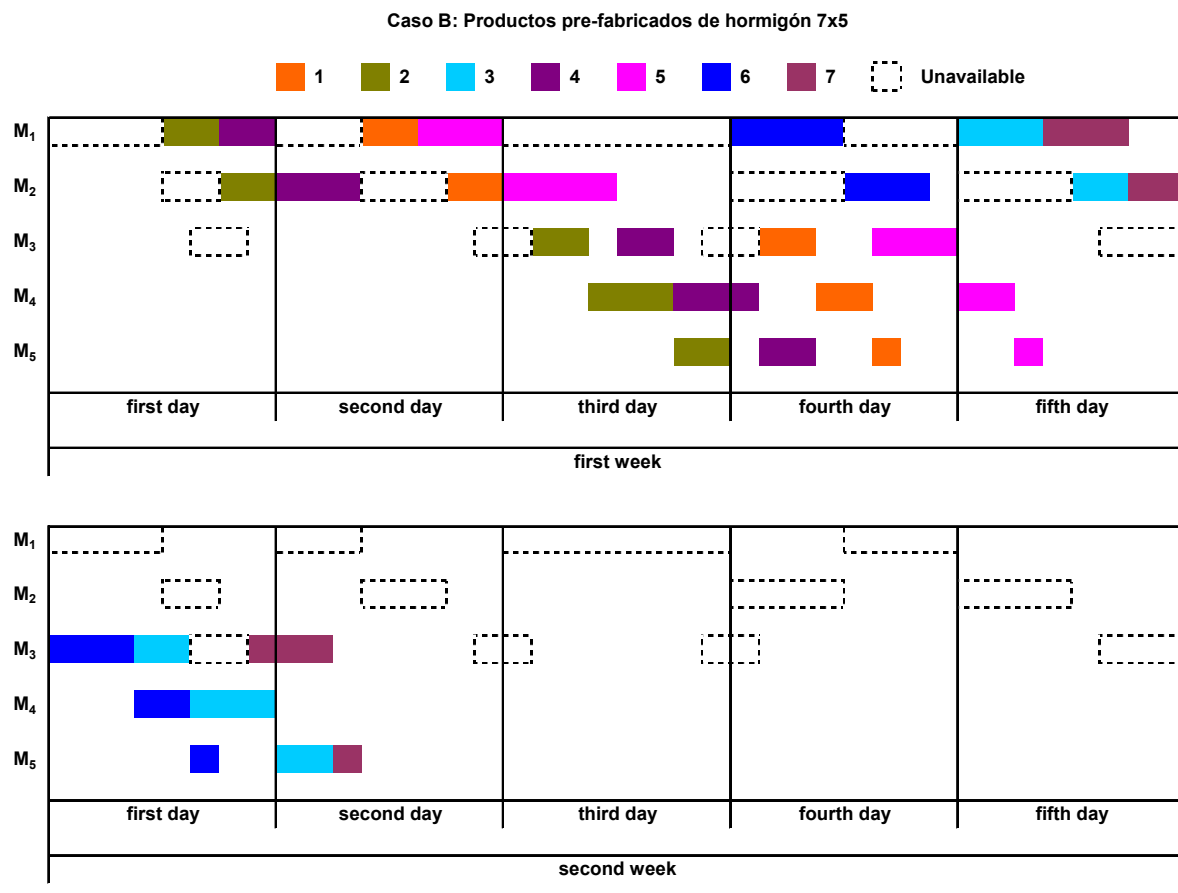


Fig. 76 Caso B: Productos pre-fabricados de hormigón (*scheduling*)

Trials	500
Mean	50,99
Median	50,98
Standard Deviation	3,04
Variance	9,24
Coeff. of Variability	0,0596
Minimum	39,29
Maximum	61,48
Range Width	22,19

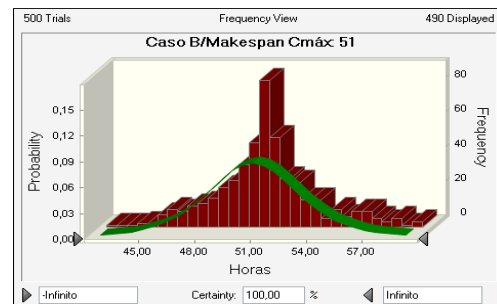


Fig. 77 Distribución de probabilidades del *Makespan* (Caso: B)

En la Fig. 79 se brinda información referida a los experimentos de simulación realizado sobre todo el conjunto de soluciones ((1;  $S$ : 3,04), (2;  $S$ : 2,20), (3;  $S$ : 3,34), (4;  $S$ : 3,92)). Se observa que la última solución posee el mayor desvío estándar. Esto debe ser tenido en cuenta al decidir por una determinada programación. Todas las distribuciones toman la misma forma, siendo la causa lo especificado anteriormente.

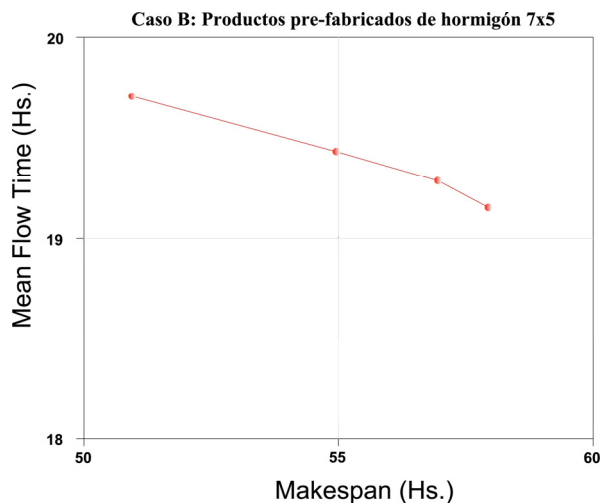


Fig. 78 *Makespan vs. Mean Flow Time* (Caso: B)

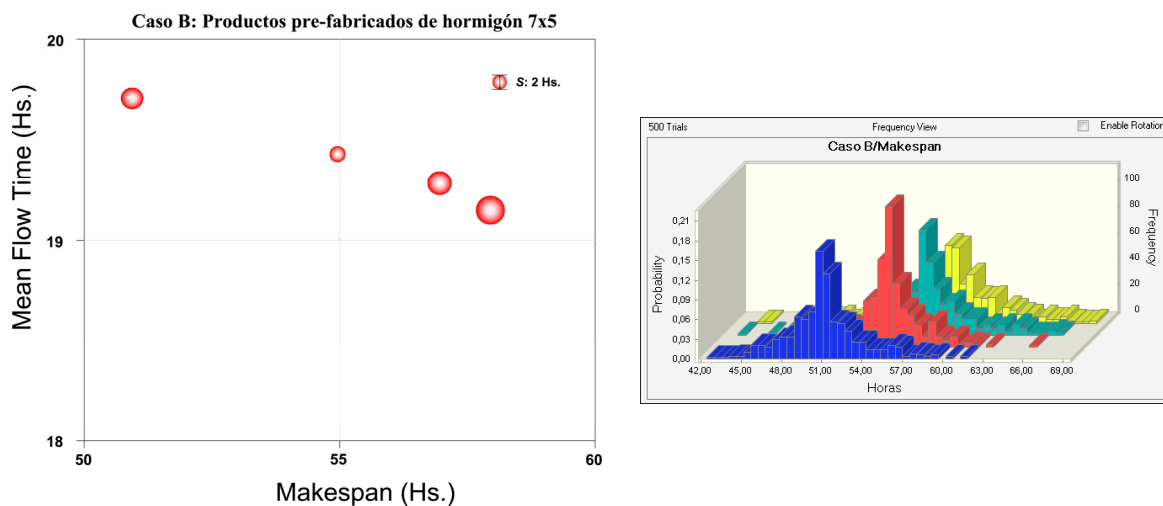


Fig. 79 Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (Caso: B)

### 6.3 CASO C: PRODUCTOS DE MARMOL

El tercer, y último caso a resolver se refiere a la elaboración de productos de mármol. La empresa también sigue con la configuración estudiada en la presente tesis por lo que se



efectuara la aplicación del procedimiento desarrollado sobre la misma (Fig. 80). Esta empresa también posee dos tipos de producción, estandarizada (escalones, recubrimientos, pisos, etc.) y no estandarizada (mesada de mármol para cocina, lavamanos de baño de mármol, etc.). Sobre esta última se volcara la aplicación cuya disponibilidad de máquinas y/o centros de trabajos, al igual que la anterior, dependerá de la asignación ya establecida de las mismas a la producción estandarizada. A continuación se hará una descripción general del proceso. El mismo se inicia una vez trasladadas las placas desde el depósito hasta el área de corte, ya sea cargando la plancha a mano o con la utilización de un aparejo mecánico.

La primera fase en la elaboración de un producto es el corte y limado de la placa de mármol. A la placa se le realiza cortes longitudinales y transversales, los cuales determinan el tamaño del producto según lo establecen sus especificaciones técnicas. Estos cortes son ejecutados por máquinas sofisticadas que utilizan discos de punta de diamante. De esta manera se finaliza el despiece de la placa en cuestión. Los sobrantes que quedan se guardan para su utilización en otros productos. Antes de terminar esta fase, se lleva la placa ya cortada a la zona de limado donde a mano se eliminan imperfecciones del corte en bordes y extremos.

La segunda fase es el agujereado y pulido. Durante esta operación se realizan los orificios en la placa de acuerdo al tipo de accesorios (grifería, bachas, etc.) que se colocarán en ella. Luego, se dirige la pieza a la pulidora donde se realiza el pulido final del producto dándole la terminación requerida. Para esto se utilizan diferentes discos de acuerdo a las características deseadas.

Por último, en la tercer fase, se realiza el ensamble o armado. Se debe chequear que todos los accesorios a unir estén completos y sin defectos. Para la colocación de algunos accesorios se coloca resina náutica en los bordes de los orificios, para luego pegar y fijar los mismos. En el caso que el producto contenga partes de madera, el carpintero se encargara de fabricar los accesorios detallados en el expediente técnico, dando por finalizado el proceso de fabricación del producto.



Fig. 80 Caso C: Productos de mármol



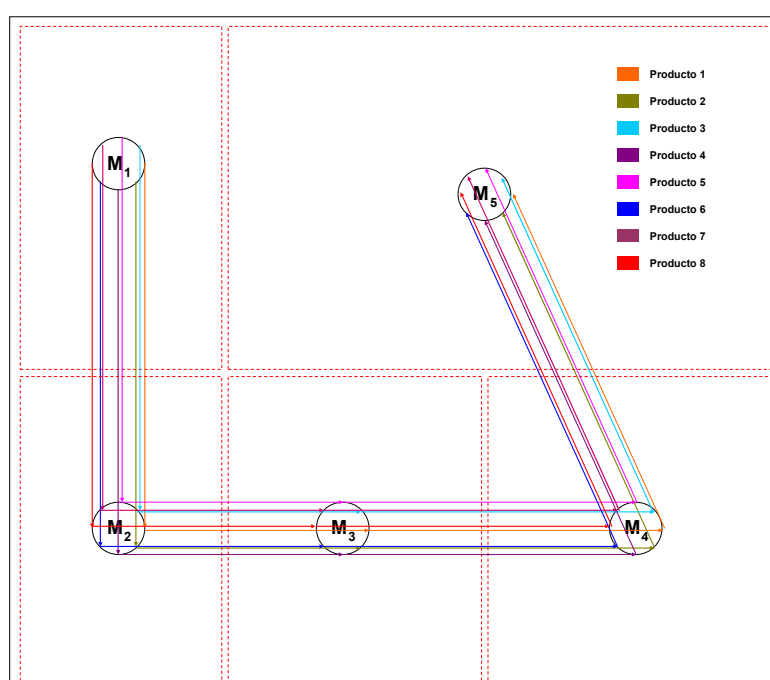


Fig. 80 Caso C: Productos de mármol (Continuación)



Después de terminado el proceso, se realiza el embalaje del producto para evitar que sea rayado por algún elemento. Todos los productos son colocados en el depósito, los cuales serán buscados por el comprador o serán enviados al destino.

El caso permite establecer la utilización de 5 máquinas y/o centros de trabajo ( $M_1$ : corte,  $M_2$ : limado,  $M_3$ : agujereado,  $M_4$ : pulido,  $M_5$ : ensamblado). Además, el estudio se centra en la elaboración de 8 productos diferentes. El diagrama de flujo que representa el proceso de cada producto se muestra en Fig. 81.



**Fig. 81** Caso C: Productos de mármol (*lay-out*)

Se pudo observar que el proceso en si tiene una alta flexibilidad, ya que justamente los muebles son a medida del cliente. Las máquinas empleadas fueron evolucionando a través de los años, lo que permitió que se mecanicen algunos de los procesos de conformado, permitiendo acortar los tiempos de producción y facilitando el trabajo de los operarios logrando una mejor calidad de los productos. Este avance tecnológico permitió a la empresa optimizar los resultados obtenidos.

Se presenta en la Tabla 36 los datos del problema referidos a este caso de estudio. La

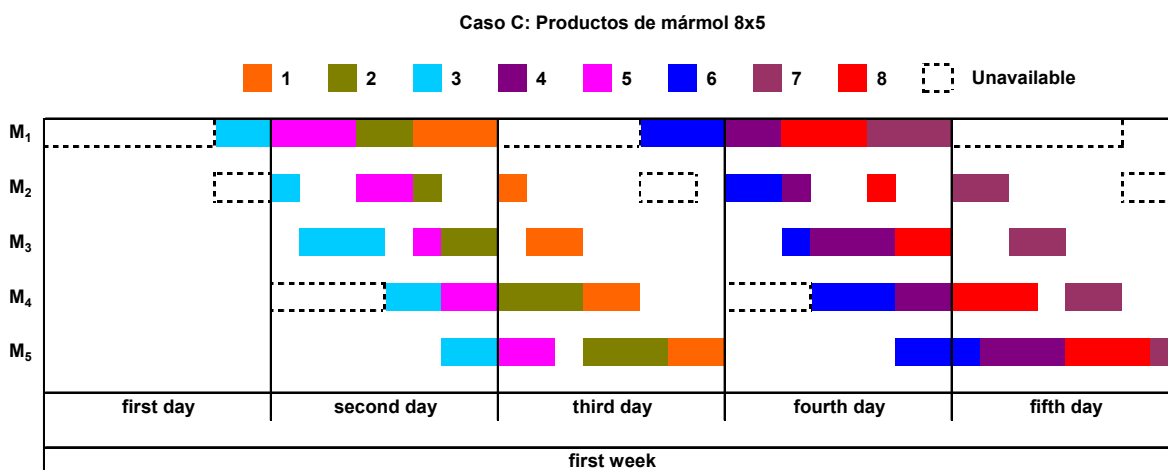
información brindada establece la máquina  $M_k$  y/o centro de trabajo donde se realiza cada operación, y el tiempo de procesamiento ( $\tau_{ij}^k$ ) y su desvío estándar ( $S_{ij}^k$ ) en horas para esta última.

**Tabla 36** Datos iniciales del *Job-Shop Scheduling Problem* (Caso: C)

$J_i$	$O_{1j}^k$			$O_{2j}^k$			$O_{3j}^k$			$O_{4j}^k$			$O_{5j}^k$		
	$M_k$	$\tau_{1j}^k$	$S_{1j}^k$	$M_k$	$\tau_{2j}^k$	$S_{2j}^k$	$M_k$	$\tau_{3j}^k$	$S_{3j}^k$	$M_k$	$\tau_{4j}^k$	$S_{4j}^k$	$M_k$	$\tau_{5j}^k$	$S_{5j}^k$
$J_1$	$M_1$	3	0,25	$M_2$	1	0,05	$M_3$	2	0,15	$M_4$	2	0,15	$M_5$	2	0,15
$J_2$	$M_1$	2	0,15	$M_2$	1	0,10	$M_3$	2	0,20	$M_4$	3	0,20	$M_5$	3	0,20
$J_3$	$M_1$	2	0,10	$M_2$	1	0,05	$M_3$	3	0,30	$M_4$	2	0,15	$M_5$	2	0,20
$J_4$	$M_1$	2	0,15	$M_2$	1	0,05	$M_3$	3	0,25	$M_4$	2	0,20	$M_5$	3	0,30
$J_5$	$M_1$	3	0,20	$M_2$	2	0,15	$M_3$	1	0,05	$M_4$	2	0,20	$M_5$	2	0,15
$J_6$	$M_1$	3	0,15	$M_2$	2	0,20	$M_3$	1	0,05	$M_4$	3	0,25	$M_5$	3	0,20
$J_7$	$M_1$	3	0,25	$M_2$	2	0,15	$M_3$	2	0,15	$M_4$	2	0,15	$M_5$	1	0,05
$J_8$	$M_1$	3	0,20	$M_2$	1	0,05	$M_3$	2	0,20	$M_4$	3	0,20	$M_5$	3	0,25

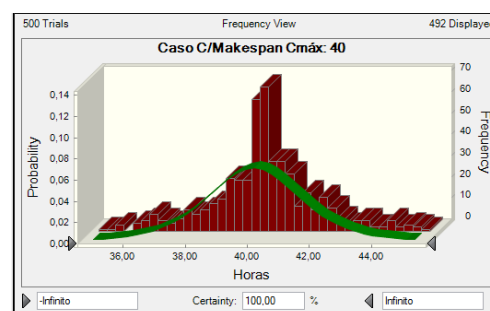
Luego de ejecutar *(LS)NSGAI*, se obtuvo una programación con un valor para el *Makespan* de 40 horas (Fig. 82). Se aprecia en la figura que se respeta en esta programación las restricciones de asignación de las máquinas y/o centros de trabajo a la producción estandarizada. Además, en la Fig. 83, se brinda información referida al experimento de simulación realizado para esta programación. Al analizar la distribución de probabilidades presentada se observa que no se ajusta a lo esperado. La forma que adopta esta distribución, al igual que el caso anterior, se debe a que se satisfacen las restricciones propuestas referidas a las disponibilidades de las maquinas y/o centros de trabajos.

Con respecto al conjunto de las soluciones obtenidas (Fig. 84), las mismas presentan diferentes intervalos operativos ((1;  $C_{máx}$ : 40,0;  $\bar{F}$ : 11,25), (2;  $C_{máx}$ : 47,0;  $\bar{F}$ : 10,87), (3;  $C_{máx}$ : 49,0;  $\bar{F}$ : 10,75)). Estos intervalos van de 40 a 49 horas, lo que posibilita el análisis con respecto al otro objetivo involucrado. El *Mean Flow Time* se reduce de 11,25 a 10,75 horas (4,4 %). Por ejemplo, si se pasa de la primera a la segunda solución del conjunto se observa un aumento *Makespan* del 17,5 %, reduciendo el *Mean Flow Time* en un 3,3 %.



**Fig. 82** Caso C: Productos de mármol (*scheduling*)

Trials	500
Mean	40,13
Median	40,04
Standard Deviation	1,90
Variance	3,62
Coeff. of Variability	0,0474
Minimum	32,47
Maximum	48,79
Range Width	0,09



**Fig. 83** Distribución de probabilidades del *Makespan* (Caso: C)

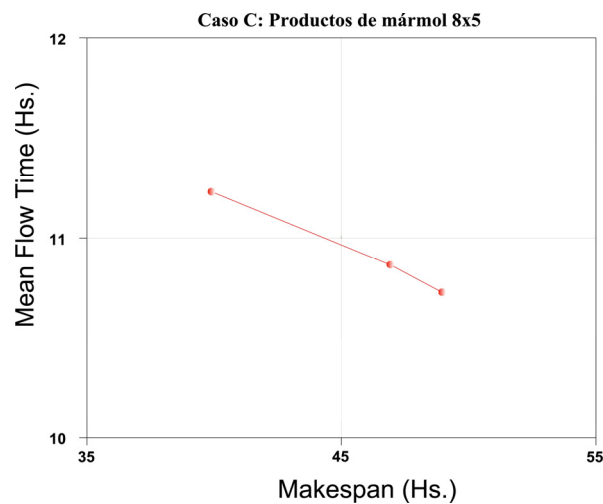
En la Fig. 85 se brinda información referida a los experimentos de simulación realizado sobre todo el conjunto de soluciones ((1;  $S$ : 1,90), (2;  $S$ : 2,55), (3;  $S$ : 3,52)). Se observa que la última solución posee el mayor desvío estándar. Esto debe ser tenido en cuenta al decidir por una determinada programación. Todas las distribuciones toman la misma forma, siendo la causa lo especificado anteriormente.

## 6.4 RESUMEN DEL CAPÍTULO

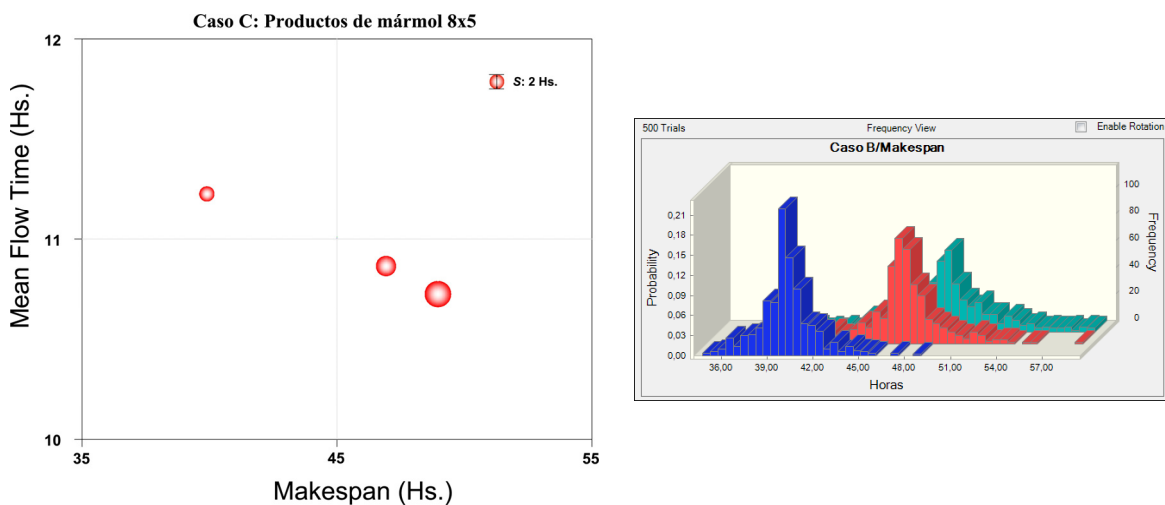
En este capítulo se presentaron algunas aplicaciones del procedimiento desarrollado. El mismo se consideró muy eficiente para la gestión del sistema productivo de cada una de las empresas analizadas, debido a que relacionó las variables más relevantes de dicho sistema,

ayudando a la toma de decisiones. Además, mostró una gran versatilidad al momento de adaptarse a cada uno de estos sistemas. Los resultados alcanzados fueron de gran utilidad para la dirección de cada una de las empresas. Por otra parte, se considera un importante aporte para el empresario, ya que el mismo logró conocer en detalle su sistema productivo, sus variables y la relación existente entre cada una de ellas.

Por último, y observando la riqueza de los resultados obtenidos, se considera conveniente continuar desarrollando la temática e incorporar un análisis paramétrico que contemplen algunas situaciones no desarrolladas en la actualidad.



**Fig. 84** Makespan vs. Mean Flow Time (Caso: C)



**Fig. 85** Frente de Pareto con información de variabilidad del *Makespan* (Caso: C)

## CAPÍTULO 7:

### CONCLUSIONES GENERALES, ALCANCES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Las conclusiones generales de esta tesis se han concentrado en lo que se ha considerado más importante en lo referente a los principales aportes a la investigación y al desarrollo de técnicas aplicables en el ámbito productivo.

Al comenzar el escrito, se ofreció una amplia terminológica sobre el tema y un marco conceptual para comprender el contexto general del presente estudio (Capítulo 1). Se ha llegado a los conceptos generales de los problemas que surgen en la planificación y programación de la producción en los distintos ambientes operativos. Se definió el modelo para el problema de secuenciación de trabajos en un entorno productivo tipo *Job-Shop* (*JSSP*, *Job-Shop Scheduling Problem*), presentando los objetivos y las restricciones del mismo. Además, se utilizó el grafo como herramienta de análisis para este problema (Capítulo 2). Se destacó la gran diversidad de problemas que derivan de las diferentes condiciones operativas que pueden adoptar las distintas configuraciones productivas. Debido a la dimensión y complejidad que presenta el *JSSP*, se recurrió al uso de meta-heurísticas para su resolución (Capítulo 3). Se realizaron diferentes experimentos para verificar la eficiencia de cada algoritmo implementado (Capítulo 4). Además, se adaptaron técnicas de simulación a la configuración del proceso en cada caso analizado para incorporar la influencia de factores aleatorios en la determinación de las distintas programaciones (Capítulo 5). Esto permitió

modelar adecuadamente los aspectos más importantes vinculados con la definición de parámetros en tales circunstancias. Para finalizar, se abordaron diversos problemas en diferentes empresas que operan bajo el sistema productivo estudiado a modo de poder realizar aplicaciones del procedimiento desarrollado (Capítulo 6). La idea de modelar distintos sistemas productivos permitió la valoración de las distintas configuraciones del mismo, y así hacer más eficiente su gestión.

## 7.1 CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo general de esta tesis ha sido desarrollar una técnica meta-heurística híbrida bajo el esquema general de un algoritmo evolutivo para el tratamiento de problemas que surgen en la planificación y programación de la producción en un entorno productivo tipo *Job-Shop*.

Las técnicas más conocidas se vuelcan a resolver este problema optimizando una determinada condición operativa. El estudio se centró principalmente en brindar un enfoque multi-objetivo al *JSSP*. La flexibilidad inherente de los algoritmos evolutivos hace que el conjunto de soluciones brindado por el mismo sea de especial interés debido a su alta calidad, lo que permite establecer las diferentes condiciones operativas dentro de los límites posibles. Esto fue lo que motivó el desarrollo de esta investigación.

Como resultado se diseñó un algoritmo memético multi-objetivo, el cual se presentó como *(LS)NSGAI*, para abordar el *JSSP*. Dentro del proceso evolutivo se incorporó una meta-heurística de búsqueda local (*Simulated Annealing*) que permitió una exploración más eficiente del espacio de soluciones. Para el desarrollo del *(LS)NSGAI*, se utilizó una plataforma denominada *PISA* la cual agilizó la aplicación del algoritmo.

Una de las ventajas de este algoritmo es que es muy compacto en cuanto a recursos, ya que gracias a la representación y los mecanismos utilizados para la optimización usa poca memoria y las operaciones requeridas para decodificar una solución son pocas en

comparación con otros algoritmos que utilizan una representación diferente.

Se implementaron otros tres algoritmos evolutivos multi-objetivos (*MOEAs*, *Multi-Objective Evolutionary Algorithms*) para resolver el problema planteado (*NSGA*, *SPEA* y *SPEAII*). Se utilizó un procedimiento de comparación para evaluar los conjuntos de soluciones de cada algoritmo. Se concluyó que (*LS*)*NSGAI* es la mejor alternativa, ya que supera a los otros algoritmos.

Luego del proceso de optimización, se consideró a la simulación como herramienta de soporte para capturar la realidad inmersa en el problema. Con esto es posible abordar distintos aspectos operativos del sistema y, además, hacer que se puedan realizar pronósticos de acuerdo a posibles cambios de la demanda, lo cual no sería posible con la utilización de procedimientos determinísticos.

## **7.2 ALCANCES**

Como resultado de las investigaciones y desarrollos realizados, se obtuvo un algoritmo que puede redefinirse y aplicarse a cualquier configuración productiva. Este grado de versatilidad hace que pueda adaptarse a otros sistemas productivos.

Entre los problemas en los que se puede utilizar este algoritmo se destacan aquellos donde existe una necesidad de definir el orden de un conjunto de elementos con el propósito de cumplir con determinadas pautas. Es decir, coordinar una secuencia de recursos dentro de un sistema que opera bajo determinados objetivos operativos. Interesantes desarrollos vinculados al transporte de pasajeros (*BNSP*, *Bus Network Scheduling Problem*) han sido resueltos utilizando un esquema algorítmico similar a éste (Frutos et al. 2007 y Olivera et al. 2007, 2008 y 2009).

## **7.3 FUTURAS INVESTIGACIONES**

En primer lugar, como parte de futuras investigaciones y desarrollos en lo que se refiere al

algoritmo, sería interesante experimentar con alguna otra técnica de búsqueda local como es *Taboo Search*. La paralelización del algoritmo podría ser también una ruta interesante de investigación. Además, podría agregarse una memoria en el proceso de mutación para no aplicar más de una vez la misma forma o que se obtenga un mismo resultado. La aplicación de algún procedimiento constructivo para establecer la solución inicial sería clave para mejorar la eficiencia del algoritmo.

Como extensión natural a las investigaciones realizadas con respecto al modelo, se proyecta la posibilidad de incorporar un mayor grado de detalle al mismo. Cuanto más fiel sea este modelo, mejores resultados podrán obtenerse en la realidad. Para este propósito se deben agregar otras características operativas. Además, se podrían estudiar planteamientos multi-objetivo distintos del *JSSP*.

Dada la amplitud del tema, existen diversas posibilidades futuras de investigación en el ámbito de la producción, lo que permitiría aportar importantes contribuciones. Como no se pretende acotar el conjunto de dichas posibilidades, se generaran diferentes líneas de investigación priorizando aquellas que establezcan un alto impacto en el estudio. No se ira más allá de nuestras pretensiones, no sea que todo se quede finalmente en eso y, de momento, se pondrá punto y seguido a esta investigación que naturalmente se continuará con la ilusión de buscar como quien espera hallar y de hallar como quien espera seguir buscando (Novales 1994).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- A -

Acevedo Suárez J. A. (1987). "Material complementario sobre esquema general de organización". Editorial CUJAE. La Habana.

Adam E., Ebert R. (1991). "Administración de la producción y de las operaciones". 4ta. Ed. Editorial Prentice Hall. México.

Adams J., Balas E., Zawack D. (1998). "The shifting bottleneck procedure for job-shop scheduling". Management Science. Vol. 34 (3). pp 391/401.

Ajmone M., Casetti C., Munafo M., Valdes J. (1995). "Fair queueing in ATM networks: a simulation study". Third Workshop on Performance Modeling and Evaluation of ATM Networks. Ilkley UK.

Akers S. B., Friedman J. (1955). "A non-numerical approach to production scheduling problems". Operations Research. Vol. 3 (4). pp. 429/442.

Applegate D., Cook W. (1991). "A computational study of the job-shop scheduling instance". ORSA Journal on Computing. Vol. 3. pp. 149/156.

Armentano V. A., Scrich C. R. (2000). "Tabu search for minimizing total tardiness in a job-shop". Int. J. Production Economics. Vol. 63. pp 131/140.

---

- B -

Balas E. (1969). "Duality in discrete programming: the quadratic case". Management Science. Vol. 16 (1). pp. 14/32.

Banks J., Hagan J. C., Lendermann P., McLean C., Page E. H., Pegden C. D., Ulgen O., Wilson J. R. (2003). "Future of the simulation industry". Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation. New Orleans. Louisiana.

Beasley J. E. (1990). "OR-Library: distributing test problems by electronic mail". Journal of the Operations Research Society. Vol. 41 (11). pp 1069/1072.

Bera H. (1996). "Computer aided scheduling (CAS) and manufacturing". Segundo seminario sobre sistemas avanzados de manufactura. Pereira.

Bierwirth C. (1995). "A generalized permutation approach to job-shop scheduling with genetic algorithms". *Operations Research Spektrum*. Vol. 17 (2). pp 87/92.

Bleuler S., Laumanns M., Thiele L. and Zitzler E. (2003). "PISA: a platform and programming language independent interface for search algorithms". In *Proceeding of Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. pp 494/508.

Buffa E. S. (1968). "Operations management: problems and models". Westwood. California: John Wiley.

Buffa E. S. (1984). "Meeting the competitive challenge". Editorial Irwin. Illinois.

Buffa E. S., Sarin R. (1995). "Administración de la producción y de las operaciones". Editorial Limusa. México.

---

- C -

---

Camm J. D., Evans J. R. (1996). "Management science: modelling, analysis and interpretation". South Western College Publishing.

Casal R., Frutos M., López N., Corral R. (2005). "Resolución de problemas de incertidumbre en la cadena de abastecimiento mediante simulación". In *Proceedings del XVIII Encuentro Nacional de Docentes en Investigación Operativa (XVIII ENDIO) y XVI Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa (XVI EPIO)*. Córdoba. Argentina.

Chase R., Aquilano N. (1995). "Dirección y administración de la producción y de las operaciones". 6ta. Ed. Editorial IRWIN. Barcelona.

Chase R. B., Aquilano N. J., Jacobs F. R. (2000). "Administración de producción y operaciones. Manufactura y servicios". 8va. Ed. Editorial McGraw Hill. Santa Fe de Bogotá.

Cheng C. C., Smith S. F. (1997). "Applying constraint satisfaction techniques to job-shop scheduling". *Annals of Operations Research*. Vol. 70. pp. 327/357.

Coello Coello C. A., Van Veldhuizen D. A. and Lamont G. B. (2002). "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems". Kluwer Academic Publishers. New York.

Companys P. R. (1986). "Gestión de producción". En P. Mompim (Ed.), *Sistemas CAD/CAM/CAE. Diseño y fabricación por ordenadores*. Barcelona: Boixareu Editores.

Cortés Rivera D., Coello Coello C. A., Cortés N. C. (2003). "Use of an artificial immune system for job-shop scheduling". In *Proceeding Second International Conference on Artificial Immune Systems*. Edinburgh. Scotland. Springer-Verlag. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 2787. pp 1/10.

Crawford J. M. , Baker A. B. (1994). "Experimental results on the application of satisfiability algorithms to scheduling problems". Computational Intelligence Research Laboratory.

Cribillers F. (1997). "Gestión de operaciones". Documentos DEADE. Barcelona: ESADE.

Croce F. and Tadei R. (1995). "A genetic algorithm for the job-shop problem". *Computers & Operations Research*. Vol. 22(1). pp 15/24.

Cuatrecasas L. (1999). "Gestión de la producción: aspectos estratégicos". En Álvarez et al. (Eds.). Lo que se aprende en los mejores MBA. Barcelona: Gestión 2000.

---

- D -

---

Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyarivan T. (2002). "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGAI". IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 6 (2). pp 182/197.

Díaz A. (1993). "Producción: gestión y control". Barcelona: Ariel Economía S.A.

Doll W. J., Vonderembse M.A. (1992). "The evolution of manufacturing systems: towards the post-industrial enterprise". En C.A. Voss (Ed.). Manufacturing Strategy. Process and Content. Editorial Chapman & Hall. Londres.

Domínguez Machuca J. A., García González S., Domínguez Machuca M. A., Ruiz Jiménez A., Álvarez M. J. (1995). "Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios". Editorial Mc Graw Hill. Madrid.

Dorndorf U. and Pesch E. (1995). "Evolution based learning in a job-shop scheduling environment". Computers & Operations Research. Vol. 22. pp 25/40.

---

- E -

---

---

- F -

---

Fang H., Ross P. (1993). "A promising genetic algorithm approach to job-shop scheduling, rescheduling, and open-shop scheduling problems". Fifth International Conference on Genetic Algorithms. San Francisco, CA. Morgan Kaufmann.

Frutos M. (2009). "Algoritmos evolutivos (JGGA\*NSGAI) en problemas de secuenciación de tareas". In Proceeding XXXVIII Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa, Simposio de Investigación Operativa. Mar del Plata. Argentina.

Frutos M., R. Casal C., Olivera A. C. (2007). "Algoritmo híbrido estocástico aplicado al diseño de rutas y determinación de frecuencias en el transporte público urbano". In Proceedings del V Congreso Español sobre Meta-heurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados. Puerto de la Cruz. Tenerife. España.

Frutos M., Olivera A. C. (2008). "Job-shop scheduling problem: desarrollo de un procedimiento eficiente". In Proceeding XIV Congreso Latino-Ibero-Americano en Investigación de Operaciones. Cartagena de Indias. Colombia.

Frutos M., Olivera A. C., Tohmé F. (2010). "A memetic algorithm based on a NSGAI scheme for the flexible job-shop scheduling problem". Annals of Operations Research. forthcoming.

Frutos M., Tohmé F. (2009). “Desarrollo de un procedimiento genético diseñado para programar la producción en un sistema de manufactura tipo job-shop”. In Proceeding VI Congreso Español sobre Meta-heurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados. Málaga. España.

Fisher H., Thompson G. L. (1963). “Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules”. Industrial Scheduling. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey. pp 225/251.

Ford L. R. and Fulkerson D. R. (1962). “Flows in networks”. Princeton University Press.

---

- G -

---

Giffler B., Thomson G. L. (1960). “Algorithms for solving production scheduling problems”. Operations Research. Vol. 8. pp. 487/503.

Goldberg D. (1989). “Genetic algorithms in search, optimization and machine learning”. Addison Wesley.

Gorostegui E. (1991). “Economía de la empresa”. Centro de Estudios Ramón Areces S.A. Madrid.

Gousty Y., Kieffer J. P. (1988). “Una nueva tipología para los sistemas industriales de producción”. Revista Francesa de Gestión. Paris.

Guasch A., Piera M. A., Casanovas J., Figueres J. (2002). “Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios”. Edicions UPC.

---

- H -

---

Hax A. C., Majluf N. S. (1999). “Estrategias para el liderazgo competitivo. De la visión a los resultados”. Buenos Aires: Granica.

Hayes R. H., Wheelwright S.C. (1984). “Restoring our competitive edge: competing through manufacturing”. Nueva York: John Wiley & Sons.

Heinonen J., Pettersson F. (2007). “Hybrid ant colony optimization and visibility studies applied to a job-shop scheduling problem”. Applied Mathematics and Computation. Elsevier. Vol. 187 (2). pp. 989/998.

Heizer J., Render B. (1997). “Dirección de la producción. Decisiones estratégicas”. Editorial Prentice-Hall. Madrid.

Hill T. (1997). “La esencia de la administración de operaciones”. Editorial Prentice Hall. México.

Hill T. (1993). “Manufacturing Strategy. The strategic management of the manufacturing function”. Editorial Mc Millan. Basingstoke.

Holland J. H. (1975). "Adaptation in natural and artificial systems". Ann Arbor. Hoogeveen H. (2005). "Multicriteria scheduling". European Journal of operational research. Vol. 167. pp. 592/623.

Holsapple C. W. and Jacob V. S. (1993). "A genetics-based hybrid scheduler for generating static schedules in flexible manufacturing contexts". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. 23 (4). pp 953/972.

Hopeman R. J. (1991). "Administración de producción y operaciones. Planeación, análisis y control". Editorial Continental S.A. México.

---

- I -

---

Ishibuchi H., Yoshida T. and Murata T. (2003). "Balance between genetic search and local search in memetic algorithms for multiobjective permutation flow-shop scheduling". IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 7. pp 204/223.

---

- J -

---

Jackson J. R. (1956). "An extension of johnson's results on job-lot scheduling". Naval Research Logistics Quarterly. Vol. 2. pp. 201/203.

Jaszkiwicz A. (2004). "A comparative study of multiple-objective metaheuristics on the bi-objective set covering problem and the pareto memetic algorithm". Annals Operational Research. Vol. 131(4). pp 135/158.

Johnson S. M. (1954). "Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included". Naval Research Logistics Quarterly. Vol. 1. pp. 61/68.

---

- K -

---

Kalenatic D., Blanco, L. E. (1993). "Aplicaciones computaciones en producción". Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Santa Fe de Bogotá.

Kirkpatrick S. (1984). "Optimization by simulated annealing: quantitative studies". Journal of Statistical Physics. Vol. 34. pp 5/6.

---

- L -

---

Larrazábal M. C. (2003). "Configuración de sistemas de producción, optimización basada en simulación". Memoria de Título. Universidad de Concepción. Chile.

Lawrence S. (1984). "Resource constrained project scheduling: an experimental investigation of heuristic scheduling techniques". Graduate School of Industrial Administration. Carnegie-Mellon University. Pittsburgh. Pennsylvania.

---

- M -

---

Matsuo H., Suh C. J. and Sullivan R. S. (1989). "A controlled search simulated annealing method for the single machine weighted tardiness problem". Annals of Operations Research. Vol. 21 (1). pp 85/108.

Meredith J., Gibbs T. (1986). "Administración de operaciones". Editorial Limusa. México.

Merkle D., Middendorf M. (2001). "A new approach to solve permutation scheduling problems with ant colony optimization". Applications of Evolutionary Computing. EvoWorkshops 2001. Proceedings. Vol. 2037. pp 484/494.

Miltenburg J. (1995). "Manufacturing strategy". Editorial Productivity Press. Portland.

Mollaghasemi M., Le-Croy K., Georgiopoulos M. (1998). "Application of neural networks and simulation". Modeling in Manufacturing System Design. Interfaces 28. pp. 322/326.

Monks J. G. (1992). "Administración de operaciones". Editorial McGraw Hill. México.

Muth J. F., Thompson G. L. (1964). "Industrial scheduling". Prentice-Hall Inc.

---

- N -

---

Nahmias S. (1997). "Production and operations analysis". 3ra. Ed. Editorial IRWIN. Chicago.

Nakano R. and Yamada T. (1991). "Conventional genetic algorithm for job-shop problems". International Conference on Genetic Algorithms.

Narasimhan S., Mcleavey D. W., Billington P. (1996). "Planeación de la producción y control de inventarios". Editorial Prentice Hall. México.

Novalés A. (1994). "Econometría". 3era. Ed. Editorial Mc Graw Hill. México D.F.

---

- Ñ -

---

---

- O -

---

Ochoa C., Arana P. (1996). "Gestión de la producción. Conceptos, tipología de problemas, métodos y problemas de implantación". Editorial Donostiarra S.A. San Sebastián.

Osyczka A. (1984). "Multicriterion optimization in engineering with FORTRAN programs". Ellis Horwood Limited.

Olivera A. C., Frutos M., Carballido J. A., Ponzoni I., Brignole N. B. (2009). "Bus network scheduling problem: GRASP + EAs with PISA \* Simulation". 10th International Work-Conference on Artificial Neural Networks (IWANN 2009). Lecture Notes in Computer Science. Springer Verlag. Part I, LNCS 5517. pp. 1272/1279.

Olivera A. C., Frutos M., Carballido J. A., Brignole N. B. (2008). "Bus network optimization with a time-dependent hybrid algorithm". J.UCS Journal of Universal Computer Science,

Graz University of Technology, and supported by the KNOW Center and University of Applied Sciences. Vol. 14 (15). pp. 2512/2531.

Olivera A. C., Frutos M., Carballido J. A., Brignole N. B. (2007). "Bus network optimization through time-dependent hybrid algorithm". In Proceedings de la VII International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2007). Publisher IEEE Computer Society. Vol. 0. pp. 857/862.

---

- P -

---

Panwalker S., Iskander W. (1977). "A survey of scheduling rules". Operations Research. Vol. 25 (1). pp. 45/61.

Papadimitriou C. H. (1994). "Computational complexity". Addison Wesley. USA. Perregaard M. (1995). "Branch-and-bound methods for the Processor Job-Shop and Flow-Shop scheduling problems". Master Thesis. Supervisor: Jens Clausen. DIKU.

Pinedo M. (1995). "Scheduling theory, algorithms and systems". Prentice Hall. USA.

---

- Q -

---

---

- R -

---

Reeves C. R. (1995). "A genetic algorithm for flow-shop sequencing". Computers & Operations Research. Vol. 22 (1). pp 5/13.

Roy B., Sussman B. (1964). "Les problèmes d'ordonnancement avec contraintes disjonctives". SEMA.

Russell R., Taylor B. (1998). "Operations management. Focusing on quality and competitiveness". 2da. Ed. Editorial Prentice Hall. New Jersey.

---

- S -

---

Sadeh N. M., Fox M. S. (1995). "Variable and value ordering heuristics for the job-shop scheduling constraint satisfaction problem". Technical report CMU-RI-TR-95-39. Appear in the Artificial Intelligence Journal.

Schroeder R. (1992). "Administración de operaciones, toma de decisiones en la función de operaciones". 3ra. Ed. Editorial Mc Graw Hill. México.

Smith S. F., Cheng C. C. (1993). "Slack-based heuristics for constraint satisfaction scheduling". In Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence. pp. 134/144.

Srinivas N. (1994). "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms". Master tesis. Indian Institute of Technology. Kuanpur. Inda.

Starr M. (1979). "Administración de la producción. Sistemas y síntesis". Editorial Dossat S.A. Madrid.

Stiles G. and Lee F. (2003). "Robust simulated annealing". <http://www.engineering.usu.edu>.

Storer R. H., Wu S. D., Vaccari R. (1992). "New search spaces for sequencing instances with application to job-shop scheduling". *Management Science*. Vol. 38. pp. 1495/1509.

---

- T -

---

Taillard E. D. (1994). "Taboo search techniques for the job-shop scheduling problem". *Journal on Computing*. Vol. 27 (2). pp 257/63.

Tawfik L., Chauvel A.M. (1992). "Administración de la producción". Ed. Mc Graw Hill. México.

T'kindt V., Billaut J. C. (2006). "Multicriteria scheduling". Theory, models and algorithms. Springer. Alemania.

---

- U -

---

Ullman J. D. (1975). "NP-complete scheduling problems". *Journal of Computer System sciences*. Vol. 10. pp. 384/393.

---

- V -

---

Van Laarhoven P. J. M., Aarts E. H. L. and Lenstra J. K. (1992). "Job-shop scheduling by simulated annealing". *Operations Research*. Vol. 40 (1). pp 113/125.

---

- W -

---

Winston W. L., Albright S. C. (1997). "Practical management science: spreadsheet modeling and applications". Duxbury Press.

Womack J., Jones D., Roos D. (1991). "The machine that changed the world". Editorial Harper Perennial Press. Nueva York.

Woodward J. (1965). "Industrial organization. theory y practice". Editorial Oxford University Press. Oxford.

Wu C. G., Xing X. L., Lee H. P., Zhou C. G., Liang Y. C. (2004). "Genetic algorithm application on the job-shop scheduling problem". *Machine Learning and Cybernetics. Proceedings of 2004 International Conference*. Vol. 4. pp 2102/2106.

---

- X -

---

---

- Y -

---



Yamada T. and Nakano R. (1992). "A genetic algorithm applicable to large-scale job-shop problems". Problem Solving from Nature. Vol. 2. pp 281/290.

- Z -

---

Zalzala A. M. S., Flemming P. J. (1997). "Genetic algorithms in engineering systems". London Institution of Electrical Engineers.

Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. (2002). "SPEA2: improving the strength pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization". In Giannakoglou, Tsahalis, Periaux, Papailiou, and Fogarty (eds). Evolutionary Methods for Design. Optimisations and Control. pp 19/26.

Zitzler E., Thiele L. (1999). "Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach". IEEE Trans. Evolutionary Computation. Vol. 3 (4). pp 257/271.

## ANEXO 1:

### PROBLEMÁTICA DE LA OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA

En este párrafo se aborda la problemática de la optimización combinatoria. Esta es una rama de la matemática discreta orientada a la resolución de problemas de la vida real que involucra hallar un óptimo de una función objetivo sobre un conjunto discreto. La optimización combinatoria, nacida a mediados del siglo XX, se ha desarrollado enormemente hasta la actualidad y hoy tiene importantes aplicaciones en el nivel industrial, informático, científico, etc., y en todos los ámbitos en que se presenten situaciones en que se requiera minimizar costos, demoras, recorridos, etc.

El estudio de los problemas de optimización combinatoria se centra indudablemente en hallar métodos o algoritmos que procuren la resolución efectiva de los mismos. Pero surge inmediatamente la pregunta ¿es posible encontrar algoritmos que brinden soluciones óptimas en circunstancias del mundo real? La respuesta no es muy alentadora, muchos problemas de optimización combinatoria se encuentran contenidos en la clase *NP-hard* o problemas en los que el tiempo de cómputo necesario para resolverlos crece desproporcionadamente conforme aumenta el tamaño del problema. Para dar una idea acerca de este comportamiento, se dirá que se traduce en inconvenientes severos a la hora de conciliar el tratamiento de problemas de mediana envergadura y la aspiración de conocer la solución en el término de nuestra vida natural. Esto es lo que obliga a buscar un nuevo ángulo para el tratamiento y el que se presenta como más satisfactorio es aquel que parece venir inspirado en una analogía con el

problema de hallar raíces de polinomios. Como es sabido, hallar raíces exactas es laborioso pero aproximarlas puede hacerse mucho más sencillamente mediante procedimientos iterativos. La idea entonces, es comprometer la calidad de las soluciones aspirando a soluciones cuasi-óptimas en pos de asegurar la posibilidad de alcanzarlas en intervalos de tiempo admisibles.

Por lo tanto, se reformula la pregunta anterior de la siguiente manera, ¿es posible encontrar algoritmos que en circunstancias reales, encuentren “buenas” soluciones? Aquí, la respuesta es afirmativa. En primer lugar, se debe destacar que este nuevo enfoque que se ha ensayado se ha consolidado como campo de estudio científico bajo el nombre de “heurística” y ha traído aparejado el desarrollo de nuevos, potentes y más sofisticados algoritmos y a la vez, de nuevas herramientas que posibilitan medir y analizar los parámetros emanados de esos últimos.

Hasta nuestros días, perduran los esfuerzos constantes por experimentar algoritmos más veloces, que aporten soluciones más precisas a problemas cada vez más complejos que reportan continuamente las diversas actividades humanas.

## ANEXO 2:

### BEASLEY'S OR-LIBRARY: *FT06*, *FT10* Y *FT20*, Y *LA01* AL *LA40*

---

***ft06 6x6***

2	1	0	3	1	6	3	7	5	3	4	6
1	8	2	5	4	10	5	10	0	10	3	4
2	5	3	4	5	8	0	9	1	1	4	7
1	5	0	5	2	5	3	3	4	8	5	9
2	9	1	3	4	5	5	4	0	3	3	1
1	3	3	3	5	9	0	10	4	4	2	1

---

***ft10 10x10***

0	29	1	78	2	9	3	36	4	49	5	11	6	62	7	56	8	44	9	21
0	43	2	90	4	75	9	11	3	69	1	28	6	46	5	46	7	72	8	30
1	91	0	85	3	39	2	74	8	90	5	10	7	12	6	89	9	45	4	33
1	81	2	95	0	71	4	99	6	9	8	52	7	85	3	98	9	22	5	43
2	14	0	6	1	22	5	61	3	26	4	69	8	21	7	49	9	72	6	53
2	84	1	2	5	52	3	95	8	48	9	72	0	47	6	65	4	6	7	25
1	46	0	37	3	61	2	13	6	32	5	21	9	32	8	89	7	30	4	55
2	31	0	86	1	46	5	74	4	32	6	88	8	19	9	48	7	36	3	79
0	76	1	69	3	76	5	51	2	85	9	11	6	40	7	89	4	26	8	74
1	85	0	13	2	61	6	7	8	64	9	76	5	47	3	52	4	90	7	45

---

***ft20 20x5***

0	29	1	9	2	49	3	62	4	44
0	43	1	75	3	69	2	46	4	72
1	91	0	39	2	90	4	12	3	45
1	81	0	71	4	9	2	85	3	22
2	14	1	22	0	26	3	21	4	72
2	84	1	52	4	48	0	47	3	6
1	46	0	61	2	32	3	32	4	30
2	31	1	46	0	32	3	19	4	36
0	76	3	76	2	85	1	40	4	26
1	85	2	61	0	64	3	47	4	90
1	78	3	36	0	11	4	56	2	21
2	90	0	11	1	28	3	46	4	30
0	85	2	74	1	10	3	89	4	33
2	95	0	99	1	52	3	98	4	43
0	6	1	61	4	69	2	49	3	53
1	2	0	95	3	72	4	65	2	25
0	37	2	13	1	21	3	89	4	55
0	86	1	74	4	88	2	48	3	79
1	69	2	51	0	11	3	89	4	74
0	13	1	7	2	76	3	52	4	45

---

***la01 10x5***

---

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

---

1	21	0	53	4	95	3	55	2	34
0	21	3	52	4	16	2	26	1	71
3	39	4	98	1	42	2	31	0	12
1	77	0	55	4	79	2	66	3	77
0	83	3	34	2	64	1	19	4	37
1	54	2	43	4	79	0	92	3	62
3	69	4	77	1	87	2	87	0	93
2	38	0	60	1	41	3	24	4	83
3	17	1	49	4	25	0	44	2	98
4	77	3	79	2	43	1	75	0	96

---

**1a02 10x5**

---

0	20	3	87	1	31	4	76	2	17
4	25	2	32	0	24	1	18	3	81
1	72	2	23	4	28	0	58	3	99
2	86	1	76	4	97	0	45	3	90
4	27	0	42	3	48	2	17	1	46
1	67	0	98	4	48	3	27	2	62
4	28	1	12	3	19	0	80	2	50
1	63	0	94	2	98	3	50	4	80
4	14	0	75	2	50	1	41	3	55
4	72	2	18	1	37	3	79	0	61

---

**1a03 10x5**

---

1	23	2	45	0	82	4	84	3	38
2	21	1	29	0	18	4	41	3	50
2	38	3	54	4	16	0	52	1	52
4	37	0	54	2	74	1	62	3	57
4	57	0	81	1	61	3	68	2	30
4	81	0	79	1	89	2	89	3	11
3	33	2	20	0	91	4	20	1	66
4	24	1	84	0	32	2	55	3	8
4	56	0	7	3	54	2	64	1	39
4	40	1	83	0	19	2	8	3	7

---

**1a04 10x5**

---

0	12	2	94	3	92	4	91	1	7
1	19	3	11	4	66	2	21	0	87
1	14	0	75	3	13	4	16	2	20
2	95	4	66	0	7	3	7	1	77
1	45	3	6	4	89	0	15	2	34
3	77	2	20	0	76	4	88	1	53
2	74	1	88	0	52	3	27	4	9
1	88	3	69	0	62	4	98	2	52
2	61	4	9	0	62	1	52	3	90
2	54	4	5	3	59	1	15	0	88

---

**1a05 10x5**

---

1	72	0	87	4	95	2	66	3	60
4	5	3	35	0	48	2	39	1	54
1	46	3	20	2	21	0	97	4	55
0	59	3	19	4	46	1	34	2	37
4	23	2	73	3	25	1	24	0	28
3	28	0	45	4	5	1	78	2	83
0	53	3	71	1	37	4	29	2	12
4	12	2	87	3	33	1	55	0	38
2	49	3	83	1	40	0	48	4	7
2	65	3	17	0	90	4	27	1	23

---

**1a06 15x5**

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

---

1	21	2	34	4	95	0	53	3	55
3	52	4	16	1	71	2	26	0	21
2	31	0	12	1	42	3	39	4	98
3	77	1	77	4	79	0	55	2	66
4	37	3	34	2	64	1	19	0	83
2	43	1	54	0	92	3	62	4	79
0	93	3	69	1	87	4	77	2	87
0	60	1	41	2	38	4	83	3	24
2	98	3	17	4	25	0	44	1	49
0	96	4	77	3	79	1	75	2	43
4	28	2	35	0	95	3	76	1	7
0	61	4	10	2	95	1	9	3	35
4	59	3	16	1	91	2	59	0	46
4	43	1	52	0	28	2	27	3	50
0	87	1	45	2	39	4	9	3	41

---

**1a07 15x5**

---

0	47	4	57	1	71	3	96	2	14
0	75	1	60	4	22	3	79	2	65
3	32	0	33	2	69	1	31	4	58
0	44	1	34	4	51	3	58	2	47
3	29	1	44	0	62	2	17	4	8
1	15	2	40	0	97	4	38	3	66
2	58	1	39	0	57	4	20	3	50
2	57	3	32	4	87	0	63	1	21
4	56	0	84	2	90	1	85	3	61
4	15	0	20	1	67	3	30	2	70
4	84	0	82	1	23	2	45	3	38
3	50	2	21	0	18	4	41	1	29
4	16	1	52	0	52	2	38	3	54
4	37	0	54	3	57	2	74	1	62
4	57	1	61	0	81	2	30	3	68

---

**1a08 15x5**

---

3	92	2	94	0	12	4	91	1	7
2	21	1	19	0	87	3	11	4	66
1	14	3	13	0	75	4	16	2	20
2	95	4	66	0	7	1	77	3	7
2	34	4	89	3	6	1	45	0	15
4	88	3	77	2	20	1	53	0	76
4	9	3	27	0	52	1	88	2	74
3	69	2	52	0	62	1	88	4	98
3	90	0	62	4	9	2	61	1	52
4	5	2	54	3	59	0	88	1	15
0	41	1	50	4	78	3	53	2	23
0	38	4	72	2	91	3	68	1	71
0	45	3	95	4	52	2	25	1	6
3	30	1	66	0	23	4	36	2	17
2	95	0	71	3	76	1	8	4	88

---

**1a09 15x5**

---

1	66	3	85	2	84	0	62	4	19
3	59	1	64	2	46	4	13	0	25
4	88	3	80	1	73	2	53	0	41
0	14	1	67	2	57	3	74	4	47
0	84	4	64	2	41	3	84	1	78
0	63	3	28	1	46	2	26	4	52
3	10	2	17	4	73	1	11	0	64
2	67	1	97	3	95	4	38	0	85
2	95	4	46	0	59	1	65	3	93

---

---

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

---

2 43 4 85 3 32 1 85 0 60  
4 49 3 41 2 61 0 66 1 90  
1 17 0 23 3 70 4 99 2 49  
4 40 3 73 0 73 1 98 2 68  
3 57 1 9 2 7 0 13 4 98  
0 37 1 85 2 17 4 79 3 41

---

**1a10 15x5**

---

1 58 2 44 3 5 0 9 4 58  
1 89 0 97 4 96 3 77 2 84  
0 77 1 87 2 81 4 39 3 85  
3 57 1 21 2 31 0 15 4 73  
2 48 0 40 1 49 3 70 4 71  
3 34 4 82 2 80 0 10 1 22  
1 91 4 75 0 55 2 17 3 7  
2 62 3 47 1 72 4 35 0 11  
0 64 3 75 4 50 1 90 2 94  
2 67 4 20 3 15 0 12 1 71  
0 52 4 93 3 68 2 29 1 57  
2 70 0 58 1 93 4 7 3 77  
3 27 2 82 1 63 4 6 0 95  
1 87 2 56 4 36 0 26 3 48  
3 76 2 36 0 36 4 15 1 8

---

**1a11 20x5**

---

2 34 1 21 0 53 3 55 4 95  
0 21 3 52 1 71 4 16 2 26  
0 12 1 42 2 31 4 98 3 39  
2 66 3 77 4 79 0 55 1 77  
0 83 4 37 3 34 1 19 2 64  
4 79 2 43 0 92 3 62 1 54  
0 93 4 77 2 87 1 87 3 69  
4 83 3 24 1 41 2 38 0 60  
4 25 1 49 0 44 2 98 3 17  
0 96 1 75 2 43 4 77 3 79  
0 95 3 76 1 7 4 28 2 35  
4 10 2 95 0 61 1 9 3 35  
1 91 2 59 4 59 0 46 3 16  
2 27 1 52 4 43 0 28 3 50  
4 9 0 87 3 41 2 39 1 45  
1 54 0 20 4 43 3 14 2 71  
4 33 1 28 3 26 0 78 2 37  
1 89 0 33 2 8 3 66 4 42  
4 84 0 69 2 94 1 74 3 27  
4 81 2 45 1 78 3 69 0 96

---

**1a12 20x5**

---

1 23 0 82 4 84 2 45 3 38  
3 50 4 41 1 29 0 18 2 21  
4 16 3 54 1 52 2 38 0 52  
1 62 3 57 4 37 2 74 0 54  
3 68 1 61 2 30 0 81 4 57  
1 89 2 89 3 11 0 79 4 81  
1 66 0 91 3 33 4 20 2 20  
3 8 4 24 2 55 0 32 1 84  
0 7 2 64 1 39 4 56 3 54  
0 19 4 40 3 7 2 8 1 83  
0 63 2 64 3 91 4 40 1 6  
1 42 3 61 4 15 2 98 0 74  
1 80 0 26 3 75 4 6 2 87

---

---

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

---

2 39 4 22 0 75 3 24 1 44  
1 15 3 79 4 8 0 12 2 20  
3 26 2 43 0 80 4 22 1 61  
2 62 1 36 0 63 3 96 4 40  
1 33 3 18 0 22 4 5 2 10  
2 64 4 64 0 89 1 96 3 95  
2 18 4 23 3 15 1 38 0 8

---

**1a13 20x5**

---

3 60 0 87 1 72 4 95 2 66  
1 54 0 48 2 39 3 35 4 5  
3 20 1 46 0 97 2 21 4 55  
2 37 0 59 3 19 1 34 4 46  
2 73 3 25 1 24 0 28 4 23  
1 78 3 28 2 83 0 45 4 5  
3 71 1 37 2 12 4 29 0 53  
4 12 3 33 1 55 2 87 0 38  
0 48 1 40 2 49 3 83 4 7  
0 90 4 27 2 65 3 17 1 23  
0 62 3 85 1 66 2 84 4 19  
3 59 2 46 4 13 1 64 0 25  
2 53 1 73 3 80 4 88 0 41  
2 57 4 47 0 14 1 67 3 74  
2 41 4 64 3 84 1 78 0 84  
4 52 3 28 2 26 0 63 1 46  
1 11 0 64 3 10 4 73 2 17  
4 38 3 95 0 85 1 97 2 67  
3 93 1 65 2 95 0 59 4 46  
0 60 1 85 2 43 4 85 3 32

---

**1a14 20x5**

---

3 5 4 58 2 44 0 9 1 58  
1 89 4 96 0 97 2 84 3 77  
2 81 3 85 1 87 4 39 0 77  
0 15 3 57 4 73 1 21 2 31  
2 48 4 71 3 70 0 40 1 49  
0 10 4 82 3 34 2 80 1 22  
2 17 0 55 1 91 4 75 3 7  
3 47 2 62 1 72 4 35 0 11  
1 90 2 94 4 50 0 64 3 75  
3 15 2 67 0 12 4 20 1 71  
4 93 2 29 0 52 1 57 3 68  
3 77 1 93 0 58 2 70 4 7  
1 63 3 27 0 95 4 6 2 82  
4 36 0 26 3 48 2 56 1 87  
2 36 1 8 4 15 3 76 0 36  
4 78 1 84 3 41 0 30 2 76  
1 78 0 75 4 88 3 13 2 81  
0 54 4 40 2 13 1 82 3 29  
1 26 4 82 0 52 3 6 2 6  
3 54 1 64 0 54 2 32 4 88

---

**1a15 20x5**

---

0 6 2 40 1 81 3 37 4 19  
2 40 3 32 0 55 4 81 1 9  
1 46 4 65 2 70 3 55 0 77  
2 21 4 65 0 64 3 25 1 15  
2 85 0 40 1 44 3 24 4 37  
0 89 4 29 1 83 3 31 2 84  
4 59 3 38 1 80 2 30 0 8

---



ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

0 80 2 56 1 77 4 41 3 97  
 4 56 0 91 3 50 2 71 1 17  
 1 40 0 88 4 59 2 7 3 80  
 0 45 1 29 2 8 4 77 3 58  
 2 36 0 54 3 96 1 9 4 10  
 0 28 2 73 1 98 3 92 4 87  
 0 70 3 86 2 27 1 99 4 96  
 1 95 0 59 4 56 3 85 2 41  
 1 81 2 92 4 32 0 52 3 39  
 1 7 4 22 2 12 0 88 3 60  
 3 45 0 93 2 69 4 49 1 27  
 0 21 1 84 2 61 3 68 4 26  
 1 82 2 33 4 71 0 99 3 44

**la16 10x10**

1 21 6 71 9 16 8 52 7 26 2 34 0 53 4 21 3 55 5 95  
 4 55 2 31 5 98 9 79 0 12 7 66 1 42 8 77 6 77 3 39  
 3 34 2 64 8 62 1 19 4 92 9 79 7 43 6 54 0 83 5 37  
 1 87 3 69 2 87 7 38 8 24 9 83 6 41 0 93 5 77 4 60  
 2 98 0 44 5 25 6 75 7 43 1 49 4 96 9 77 3 17 8 79  
 2 35 3 76 5 28 9 10 4 61 6 9 0 95 8 35 1 7 7 95  
 3 16 2 59 0 46 1 91 9 43 8 50 6 52 5 59 4 28 7 27  
 1 45 0 87 3 41 4 20 6 54 9 43 8 14 5 9 2 39 7 71  
 4 33 2 37 8 66 5 33 3 26 7 8 1 28 6 89 9 42 0 78  
 8 69 9 81 2 94 4 96 3 27 0 69 7 45 6 78 1 74 5 84

**la17 10x10**

4 18 7 21 9 41 2 45 3 38 8 50 5 84 6 29 1 23 0 82  
 8 57 5 16 1 52 7 74 2 38 3 54 6 62 9 37 4 54 0 52  
 2 30 4 79 3 68 1 61 8 11 6 89 7 89 0 81 9 81 5 57  
 0 91 8 8 3 33 7 55 5 20 2 20 4 32 6 84 1 66 9 24  
 9 40 0 7 4 19 8 7 6 83 2 64 5 56 3 54 7 8 1 39  
 3 91 2 64 5 40 0 63 7 98 4 74 8 61 1 6 6 42 9 15  
 1 80 7 39 8 24 3 75 4 75 5 6 6 44 0 26 2 87 9 22  
 1 15 7 43 2 20 0 12 8 26 6 61 3 79 9 22 5 8 4 80  
 2 62 3 96 4 22 9 5 0 63 6 33 7 10 8 18 1 36 5 40  
 1 96 0 89 5 64 3 95 9 23 7 18 8 15 2 64 6 38 4 8

**la18 10x10**

6 54 0 87 4 48 3 60 7 39 8 35 1 72 5 95 2 66 9 5  
 3 20 9 46 6 34 5 55 0 97 8 19 4 59 2 21 7 37 1 46  
 4 45 1 24 8 28 0 28 7 83 6 78 5 23 3 25 9 5 2 73  
 9 12 1 37 4 38 3 71 8 33 2 12 6 55 0 53 7 87 5 29  
 3 83 2 49 6 23 9 27 7 65 0 48 4 90 5 7 1 40 8 17  
 1 66 4 25 0 62 2 84 9 13 6 64 7 46 8 59 5 19 3 85  
 1 73 3 80 0 41 2 53 9 47 7 57 8 74 4 14 6 67 5 88  
 5 64 3 84 6 46 1 78 0 84 7 26 8 28 9 52 2 41 4 63  
 1 11 0 64 7 67 4 85 3 10 5 73 9 38 8 95 6 97 2 17  
 4 60 8 32 2 95 3 93 1 65 6 85 7 43 9 85 5 46 0 59

**la19 10x10**

2 44 3 5 5 58 4 97 0 9 7 84 8 77 9 96 1 58 6 89  
 4 15 7 31 1 87 8 57 0 77 3 85 2 81 5 39 9 73 6 21  
 9 82 6 22 4 10 3 70 1 49 0 40 8 34 2 48 7 80 5 71  
 1 91 2 17 7 62 5 75 8 47 4 11 3 7 6 72 9 35 0 55  
 6 71 1 90 3 75 0 64 2 94 8 15 4 12 7 67 9 20 5 50  
 7 70 5 93 8 77 2 29 4 58 6 93 3 68 1 57 9 7 0 52  
 6 87 1 63 4 26 5 6 2 82 3 27 7 56 8 48 9 36 0 95  
 0 36 5 15 8 41 9 78 3 76 6 84 4 30 7 76 2 36 1 8  
 5 88 2 81 3 13 6 82 4 54 7 13 8 29 9 40 1 78 0 75

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

9 88 4 54 6 64 7 32 0 52 2 6 8 54 5 82 3 6 1 26

**1a20 10x10**

6 9 1 81 4 55 2 40 8 32 3 37 0 6 5 19 9 81 7 40  
 7 21 2 70 9 65 4 64 1 46 5 65 8 25 0 77 3 55 6 15  
 2 85 5 37 0 40 3 24 1 44 6 83 4 89 8 31 7 84 9 29  
 4 80 6 77 7 56 0 8 2 30 5 59 3 38 1 80 9 41 8 97  
 0 91 6 40 4 88 1 17 2 71 3 50 9 59 8 80 5 56 7 7  
 2 8 6 9 3 58 5 77 1 29 8 96 0 45 9 10 4 54 7 36  
 4 70 3 92 1 98 5 87 6 99 7 27 8 86 9 96 0 28 2 73  
 1 95 7 92 3 85 4 52 6 81 9 32 8 39 0 59 2 41 5 56  
 3 60 8 45 0 88 2 12 1 7 5 22 4 93 9 49 7 69 6 27  
 0 21 2 61 3 68 5 26 6 82 9 71 8 44 4 99 7 33 1 84

**1a21 15x10**

2 34 3 55 5 95 9 16 4 21 6 71 0 53 8 52 1 21 7 26  
 3 39 2 31 0 12 1 42 9 79 8 77 6 77 5 98 4 55 7 66  
 1 19 0 83 3 34 4 92 6 54 9 79 8 62 5 37 2 64 7 43  
 4 60 2 87 8 24 5 77 3 69 7 38 1 87 6 41 9 83 0 93  
 8 79 9 77 2 98 4 96 3 17 0 44 7 43 6 75 1 49 5 25  
 8 35 7 95 6 9 9 10 2 35 1 7 5 28 4 61 0 95 3 76  
 4 28 5 59 3 16 9 43 0 46 8 50 6 52 7 27 2 59 1 91  
 5 9 4 20 2 39 6 54 1 45 7 71 0 87 3 41 9 43 8 14  
 1 28 5 33 0 78 3 26 2 37 7 8 8 66 6 89 9 42 4 33  
 2 94 5 84 6 78 9 81 1 74 3 27 8 69 0 69 7 45 4 96  
 1 31 4 24 0 20 2 17 9 25 8 81 5 76 3 87 7 32 6 18  
 5 28 9 97 0 58 4 45 6 76 3 99 2 23 1 72 8 90 7 86  
 5 27 9 48 8 27 7 62 4 98 6 67 3 48 0 42 1 46 2 17  
 1 12 8 50 0 80 2 50 9 80 3 19 5 28 6 63 4 94 7 98  
 4 61 3 55 6 37 5 14 2 50 8 79 1 41 9 72 7 18 0 75

**1a22 15x10**

9 66 5 91 4 87 2 94 7 21 3 92 1 7 0 12 8 11 6 19  
 3 13 2 20 4 7 1 14 9 66 0 75 6 77 5 16 7 95 8 7  
 8 77 7 20 2 34 0 15 9 88 5 89 6 53 3 6 1 45 4 76  
 3 27 2 74 6 88 4 62 7 52 8 69 5 9 9 98 0 52 1 88  
 4 88 6 15 1 52 2 61 7 54 0 62 8 59 5 9 3 90 9 5  
 6 71 0 41 4 38 3 53 7 91 8 68 1 50 5 78 2 23 9 72  
 3 95 9 36 6 66 5 52 0 45 8 30 4 23 2 25 7 17 1 6  
 4 65 1 8 8 85 0 71 7 65 6 28 5 88 3 76 9 27 2 95  
 9 37 1 37 4 28 3 51 8 86 2 9 6 55 0 73 7 51 5 90  
 3 39 2 15 6 83 9 44 7 53 0 16 4 46 5 24 1 25 8 82  
 1 72 4 48 0 87 2 66 9 5 6 54 7 39 8 35 5 95 3 60  
 1 46 3 20 0 97 2 21 9 46 7 37 8 19 4 59 6 34 5 55  
 5 23 3 25 6 78 1 24 0 28 7 83 8 28 9 5 2 73 4 45  
 1 37 0 53 7 87 4 38 3 71 5 29 9 12 8 33 6 55 2 12  
 4 90 8 17 2 49 3 83 1 40 6 23 7 65 9 27 5 7 0 48

**1a23 15x10**

7 84 5 58 8 77 2 44 4 97 6 89 3 5 1 58 9 96 0 9  
 6 21 1 87 4 15 5 39 2 81 3 85 7 31 8 57 9 73 0 77  
 0 40 5 71 8 34 9 82 3 70 6 22 4 10 7 80 2 48 1 49  
 5 75 2 17 3 7 6 72 4 11 7 62 8 47 9 35 1 91 0 55  
 9 20 4 12 6 71 7 67 0 64 2 94 8 15 5 50 3 75 1 90  
 6 93 5 93 1 57 7 70 8 77 4 58 0 52 2 29 9 7 3 68  
 7 56 0 95 8 48 4 26 2 82 1 63 9 36 3 27 6 87 5 6  
 3 76 5 15 9 78 1 8 8 41 2 36 4 30 6 84 0 36 7 76  
 0 75 7 13 2 81 8 29 4 54 6 82 5 88 1 78 9 40 3 13  
 2 6 1 26 7 32 6 64 4 54 0 52 5 82 3 6 9 88 8 54  
 8 62 2 67 5 32 0 62 7 69 3 61 1 35 4 72 9 5 6 93

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

2	78	9	90	0	85	1	72	8	64	6	63	3	11	7	82	5	88	4	7
4	28	9	11	7	50	6	88	0	44	5	31	2	27	1	66	8	49	3	35
2	14	5	39	6	56	4	62	3	97	9	66	7	69	1	7	8	47	0	76
1	18	8	93	7	58	6	47	3	69	9	57	2	41	5	53	4	79	0	64

**1a24 15x10**

7	8	9	75	0	72	6	74	4	30	8	43	2	38	5	98	1	26	3	19
6	19	8	73	3	43	0	23	1	85	4	39	5	13	9	26	2	67	7	9
1	50	3	93	5	80	4	7	0	55	2	61	6	57	8	72	9	42	7	46
1	68	7	43	4	99	6	60	5	68	0	91	8	11	3	96	9	11	2	72
7	84	2	34	8	40	5	7	1	70	6	74	3	12	0	43	9	69	4	30
8	60	0	49	4	59	5	72	9	63	1	69	7	99	6	45	3	27	2	9
6	71	2	91	8	65	1	90	9	98	4	8	7	50	0	75	5	37	3	17
8	62	7	90	5	98	3	31	2	91	4	38	9	72	1	9	0	72	6	49
4	35	0	39	9	74	5	25	7	47	3	52	2	63	8	21	6	35	1	80
9	58	0	5	3	50	8	52	1	88	6	20	2	68	5	24	4	53	7	57
7	99	3	91	4	33	5	19	2	18	6	38	0	24	9	35	1	49	8	9
0	68	3	60	2	77	7	10	8	60	5	15	9	72	1	18	6	90	4	18
9	79	1	60	3	56	6	91	2	40	8	86	7	72	0	80	5	89	4	51
4	10	2	92	5	23	6	46	8	40	7	72	3	6	1	23	0	95	9	34
2	24	5	29	9	49	8	55	0	47	6	77	3	77	7	8	1	28	4	48

**1a25 15x10**

8	14	4	75	3	12	2	38	0	76	5	97	9	12	1	29	7	44	6	66
5	38	3	82	2	85	4	58	6	87	9	89	0	43	1	80	7	69	8	92
9	5	1	84	0	43	6	48	4	8	7	7	3	41	5	61	8	66	2	14
2	42	1	8	0	96	5	19	4	59	7	97	9	73	8	43	3	74	6	41
6	55	2	70	3	75	8	42	4	37	7	23	1	48	5	5	9	38	0	7
8	9	2	72	7	31	0	79	5	73	3	95	4	25	6	43	9	60	1	56
0	97	2	64	3	78	5	21	4	94	9	31	8	53	6	16	7	86	1	7
3	86	7	85	9	63	0	61	2	65	4	30	5	32	1	33	8	44	6	59
2	44	3	16	4	11	6	45	1	30	9	84	8	93	0	60	5	61	7	90
7	36	8	31	4	47	6	52	0	32	5	11	2	28	9	35	3	20	1	49
8	20	6	49	7	74	4	10	5	17	3	34	0	85	2	77	9	68	1	84
1	85	5	7	8	71	6	59	4	76	0	17	3	29	2	17	7	48	9	13
2	15	6	87	7	11	1	39	4	39	8	43	0	19	3	32	9	16	5	64
6	32	2	92	5	33	8	82	1	83	7	57	9	99	4	91	3	99	0	8
4	88	7	7	8	27	1	38	3	91	2	69	6	21	9	62	5	39	0	48

**1a26 20x10**

8	52	7	26	6	71	9	16	2	34	1	21	5	95	4	21	0	53	3	55
4	55	5	98	3	39	9	79	0	12	8	77	6	77	7	66	2	31	1	42
5	37	4	92	2	64	6	54	1	19	7	43	0	83	3	34	9	79	8	62
1	87	5	77	0	93	3	69	2	87	7	38	8	24	6	41	9	83	4	60
2	98	5	25	6	75	9	77	1	49	3	17	8	79	0	44	7	43	4	96
1	7	4	61	0	95	2	35	9	10	8	35	5	28	3	76	7	95	6	9
5	59	9	43	0	46	4	28	6	52	3	16	2	59	1	91	8	50	7	27
5	9	9	43	8	14	7	71	4	20	6	54	3	41	0	87	1	45	2	39
1	28	8	66	0	78	2	37	9	42	3	26	5	33	6	89	4	33	7	8
4	96	3	27	6	78	5	84	2	94	8	69	1	74	9	81	7	45	0	69
4	24	7	32	9	25	2	17	3	87	8	81	5	76	6	18	1	31	0	20
8	90	5	28	1	72	7	86	2	23	3	99	6	76	9	97	4	45	0	58
2	17	4	98	3	48	1	46	8	27	6	67	7	62	0	42	9	48	5	27
0	80	8	50	3	19	7	98	5	28	2	50	4	94	6	63	1	12	9	80
9	72	0	75	4	61	8	79	6	37	2	50	5	14	3	55	7	18	1	41
3	96	2	14	5	57	0	47	7	65	4	75	8	79	1	71	6	60	9	22
1	31	7	47	8	58	3	32	4	44	5	58	6	34	0	33	2	69	9	51
1	44	7	40	2	17	0	62	8	66	6	15	3	29	9	38	5	8	4	97
2	58	3	50	4	63	9	87	0	57	6	21	7	57	8	32	1	39	5	20
1	85	0	84	5	56	3	61	9	15	7	70	8	30	2	90	6	67	4	20

**1a27 20x10**

---

3	60	4	48	5	95	0	87	1	72	9	5	8	35	7	39	6	54	2	66
7	37	6	34	0	97	5	55	2	21	3	20	4	59	9	46	8	19	1	46
4	45	2	73	1	24	8	28	0	28	3	25	5	23	7	83	9	5	6	78
0	53	2	12	9	12	1	37	8	33	3	71	6	55	5	29	7	87	4	38
4	90	2	49	9	27	7	65	5	7	6	23	0	48	3	83	8	17	1	40
3	85	4	25	2	84	6	64	9	13	1	66	7	46	8	59	0	62	5	19
5	88	6	67	4	14	0	41	1	73	7	57	2	53	3	80	9	47	8	74
1	78	5	64	4	63	6	46	3	84	0	84	8	28	9	52	7	26	2	41
1	11	0	64	6	97	9	38	2	17	4	85	5	73	3	10	8	95	7	67
3	93	2	95	7	43	1	65	8	32	0	59	6	85	5	46	9	85	4	60
2	61	3	41	5	49	4	23	0	66	7	49	8	70	9	99	1	90	6	17
4	13	7	7	1	98	8	57	0	73	3	73	2	68	5	40	9	98	6	9
9	86	6	76	4	14	3	41	1	85	0	37	8	19	2	17	7	54	5	79
1	40	2	53	7	97	5	87	8	96	4	84	3	16	6	66	9	52	0	95
6	33	1	33	3	87	0	18	2	55	8	13	4	77	7	60	9	42	5	74
7	92	5	91	8	79	2	54	4	69	6	79	3	33	1	61	9	39	0	16
6	82	1	41	4	28	5	64	2	78	3	76	7	6	8	49	9	47	0	58
0	52	5	42	8	24	9	91	3	47	6	88	4	91	7	52	2	28	1	35
5	82	2	76	3	86	6	93	4	84	7	38	8	95	9	37	1	21	0	23
9	77	4	8	6	42	7	64	0	70	2	45	8	45	5	28	3	67	1	86

---

**1a28 20x10**

---

8	32	1	81	4	55	7	40	0	6	5	19	9	81	3	37	2	40	6	9
2	70	3	55	7	21	4	64	1	46	8	25	9	65	0	77	5	65	6	15
7	84	4	89	3	24	1	44	2	85	8	31	9	29	6	83	5	37	0	40
4	80	5	59	0	8	2	30	6	77	3	38	1	80	7	56	9	41	8	97
6	40	2	71	0	91	7	7	9	59	8	80	3	50	5	56	1	17	4	88
7	36	9	10	0	45	6	9	4	54	8	96	2	8	5	77	1	29	3	58
6	99	8	86	3	92	0	28	1	98	4	70	5	87	9	96	2	73	7	27
1	95	3	85	5	56	4	52	0	59	2	41	6	81	8	39	9	32	7	92
1	7	7	69	4	93	6	27	5	22	0	88	8	45	3	60	9	49	2	12
7	33	2	61	8	44	5	26	1	84	6	82	3	68	0	21	9	71	4	99
8	43	0	72	4	30	5	98	9	75	1	26	7	8	6	74	3	19	2	38
6	19	2	67	8	73	1	85	9	26	4	39	7	9	0	23	5	13	3	43
8	72	7	46	5	80	3	93	2	61	4	7	9	42	1	50	0	55	6	57
4	99	0	91	9	11	5	68	7	43	3	96	2	72	8	11	6	60	1	68
9	69	0	43	3	12	8	40	1	70	6	74	2	34	5	7	4	30	7	84
7	99	3	27	4	59	5	72	2	9	6	45	0	49	9	63	1	69	8	60
0	75	3	17	2	91	7	50	8	65	5	37	9	98	1	90	6	71	4	8
9	72	1	9	3	31	6	49	2	91	8	62	7	90	0	72	5	98	4	38
4	35	2	63	5	25	6	35	8	21	7	47	3	52	1	80	0	39	9	74
2	68	5	24	9	58	8	52	0	5	6	20	3	50	7	57	1	88	4	53

---

**1a29 20x10**

---

8	14	2	38	7	44	0	76	5	97	3	12	4	75	6	66	9	12	1	29
0	43	2	85	3	82	5	38	4	58	9	89	8	92	6	87	7	69	1	80
3	41	7	7	9	5	0	43	2	14	4	8	5	61	1	84	8	66	6	48
2	42	3	74	4	59	6	41	1	8	9	73	8	43	0	96	5	19	7	97
7	23	8	42	4	37	6	55	0	7	5	5	2	70	9	38	3	75	1	48
8	9	6	43	7	31	4	25	5	73	3	95	0	79	2	72	9	60	1	56
1	7	5	21	8	53	6	16	4	94	0	97	3	78	2	64	7	86	9	31
2	65	6	59	7	85	1	33	4	30	8	44	0	61	3	86	9	63	5	32
6	45	2	44	5	61	8	93	1	30	7	90	9	84	4	11	3	16	0	60
4	47	7	36	8	31	1	49	3	20	2	28	6	52	9	35	5	11	0	32
2	77	4	10	9	68	5	17	0	85	1	84	8	20	6	49	7	74	3	34
0	17	5	7	1	85	3	29	2	17	4	76	6	59	8	71	9	13	7	48
6	87	4	39	8	43	7	11	2	15	3	32	5	64	0	19	1	39	9	16
5	33	3	99	6	32	4	91	8	82	2	92	9	99	7	57	1	83	0	8

---

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

3	91	5	39	2	69	8	27	7	7	6	21	1	38	9	62	4	88	0	48
2	67	7	80	3	24	0	88	4	18	1	44	8	45	9	64	5	80	6	38
9	59	3	72	6	47	4	40	7	21	5	43	0	51	8	52	1	24	2	15
3	70	2	31	6	20	8	76	1	40	7	43	0	32	5	88	9	5	4	77
4	47	5	64	9	85	3	49	7	58	1	26	0	32	8	80	2	14	6	94
5	59	2	96	0	5	7	79	8	34	4	75	3	26	6	9	9	23	1	11

**1a30 20x10**

6	32	3	16	1	33	8	12	7	70	4	10	9	75	0	82	5	88	2	20
8	39	4	81	3	91	5	56	9	69	1	45	6	59	0	86	2	36	7	68
3	84	2	57	7	41	5	73	4	81	0	88	8	38	9	17	6	83	1	5
4	20	5	6	2	15	8	19	1	30	0	94	6	45	7	17	3	18	9	88
9	24	6	49	5	16	4	11	3	60	7	5	8	63	1	25	2	15	0	45
1	86	8	50	2	77	6	54	9	48	0	93	3	32	7	92	5	45	4	71
5	86	6	90	3	78	9	88	2	57	0	32	7	57	8	86	4	71	1	39
2	59	3	18	9	31	4	41	7	20	5	83	8	65	0	54	6	94	1	69
3	47	4	79	6	76	0	59	1	72	2	8	9	30	5	73	7	57	8	84
0	59	2	89	4	10	7	45	3	8	5	54	6	88	8	20	9	7	1	62
5	63	6	9	4	77	3	37	2	5	8	13	9	79	1	24	7	10	0	82
0	74	1	32	2	61	7	53	4	92	9	20	8	10	3	5	6	45	5	23
2	85	9	51	0	61	5	99	4	37	6	94	1	98	8	65	3	33	7	75
0	51	3	24	5	8	6	30	7	12	8	23	2	7	4	17	9	35	1	81
1	71	5	42	8	68	2	31	6	29	3	63	4	65	9	70	7	27	0	93
1	28	5	38	4	51	7	70	2	33	8	78	9	45	3	90	6	54	0	72
0	18	2	90	4	25	6	92	8	85	5	35	7	29	1	81	9	80	3	59
5	67	2	96	1	38	4	86	0	97	3	94	7	86	6	35	9	82	8	45
2	92	8	51	4	59	6	52	5	8	9	70	1	75	3	54	7	60	0	33
3	98	7	80	5	78	0	82	2	7	9	89	1	69	4	51	8	79	6	62

**1a31 30x10**

4	21	7	26	9	16	2	34	3	55	8	52	5	95	6	71	1	21	0	53
8	77	5	98	1	42	7	66	2	31	3	39	6	77	9	79	4	55	0	12
2	64	4	92	3	34	1	19	8	62	6	54	7	43	0	83	9	79	5	37
0	93	8	24	3	69	7	38	5	77	2	87	4	60	6	41	1	87	9	83
9	77	0	44	4	96	8	79	6	75	2	98	5	25	3	17	7	43	1	49
3	76	2	35	5	28	0	95	7	95	4	61	8	35	1	7	6	9	9	10
1	91	7	27	8	50	3	16	4	28	5	59	6	52	0	46	2	59	9	43
1	45	7	71	2	39	0	87	8	14	6	54	3	41	9	43	5	9	4	20
2	37	3	26	4	33	9	42	0	78	6	89	7	8	8	66	1	28	5	33
1	74	0	69	5	84	3	27	9	81	7	45	8	69	2	94	6	78	4	96
5	76	7	32	6	18	0	20	3	87	2	17	9	25	4	24	1	31	8	81
9	97	8	90	5	28	7	86	0	58	1	72	2	23	6	76	3	99	4	45
9	48	5	27	6	67	7	62	4	98	0	42	1	46	8	27	3	48	2	17
9	80	3	19	5	28	1	12	4	94	6	63	7	98	8	50	0	80	2	50
2	50	1	41	4	61	8	79	5	14	9	72	7	18	3	55	6	37	0	75
9	22	5	57	4	75	2	14	7	65	3	96	1	71	0	47	8	79	6	60
3	32	2	69	4	44	1	31	9	51	0	33	6	34	5	58	7	47	8	58
8	66	7	40	2	17	0	62	9	38	5	8	6	15	3	29	1	44	4	97
3	50	2	58	6	21	4	63	7	57	8	32	5	20	9	87	0	57	1	39
4	20	6	67	1	85	2	90	7	70	0	84	8	30	5	56	3	61	9	15
6	29	0	82	4	18	3	38	7	21	8	50	1	23	5	84	2	45	9	41
3	54	9	37	6	62	5	16	0	52	8	57	4	54	2	38	7	74	1	52
4	79	1	61	8	11	0	81	7	89	6	89	5	57	3	68	9	81	2	30
9	24	1	66	4	32	3	33	8	8	2	20	6	84	0	91	7	55	5	20
3	54	2	64	6	83	9	40	7	8	0	7	4	19	5	56	1	39	8	7
1	6	4	74	0	63	2	64	9	15	6	42	7	98	8	61	5	40	3	91
1	80	3	75	0	26	2	87	9	22	7	39	8	24	4	75	6	44	5	6
5	8	3	79	6	61	1	15	0	12	7	43	8	26	9	22	2	20	4	80
1	36	0	63	7	10	4	22	3	96	5	40	9	5	8	18	6	33	2	62
4	8	8	15	2	64	3	95	1	96	6	38	7	18	9	23	5	64	0	89

**1a32 30x10**

---

6	89	1	58	4	97	2	44	8	77	3	5	0	9	5	58	9	96	7	84
7	31	2	81	9	73	4	15	1	87	5	39	8	57	0	77	3	85	6	21
2	48	5	71	0	40	3	70	1	49	6	22	4	10	8	34	7	80	9	82
4	11	6	72	7	62	0	55	2	17	5	75	3	7	1	91	9	35	8	47
0	64	6	71	4	12	1	90	2	94	3	75	9	20	8	15	5	50	7	67
2	29	6	93	3	68	5	93	1	57	8	77	0	52	9	7	4	58	7	70
4	26	3	27	1	63	5	6	6	87	7	56	8	48	9	36	0	95	2	82
1	8	7	76	3	76	4	30	6	84	9	78	8	41	0	36	2	36	5	15
3	13	8	29	0	75	2	81	1	78	5	88	4	54	9	40	7	13	6	82
0	52	2	6	3	6	5	82	6	64	9	88	8	54	4	54	7	32	1	26
8	62	1	35	4	72	7	69	0	62	5	32	9	5	3	61	2	67	6	93
2	78	3	11	7	82	4	7	1	72	8	64	9	90	0	85	5	88	6	63
7	50	4	28	3	35	1	66	2	27	8	49	9	11	6	88	5	31	0	44
4	62	5	39	0	76	2	14	6	56	3	97	1	7	7	69	9	66	8	47
6	47	2	41	0	64	7	58	9	57	8	93	3	69	5	53	1	18	4	79
7	76	9	81	0	76	6	61	4	77	8	26	2	74	5	22	1	58	3	78
6	30	8	72	3	43	0	65	1	16	4	92	5	95	9	29	2	99	7	64
1	35	3	74	5	16	4	85	0	7	2	81	6	86	8	61	9	35	7	34
1	97	7	43	4	72	6	88	5	17	0	43	8	94	3	64	9	22	2	42
7	99	2	84	8	99	5	98	1	20	6	31	3	74	0	92	9	23	4	89
8	32	0	6	4	55	5	19	9	81	1	81	7	40	6	9	3	37	2	40
6	15	2	70	8	25	1	46	9	65	4	64	7	21	0	77	5	65	3	55
8	31	7	84	5	37	3	24	2	85	4	89	9	29	1	44	0	40	6	83
4	80	0	8	9	41	5	59	7	56	3	38	2	30	8	97	6	77	1	80
9	59	0	91	3	50	8	80	1	17	6	40	2	71	5	56	4	88	7	7
7	36	3	58	4	54	5	77	2	8	6	9	0	45	9	10	1	29	8	96
0	28	3	92	2	73	7	27	8	86	5	87	9	96	1	98	6	99	4	70
9	32	1	95	3	85	6	81	2	41	8	39	7	92	0	59	5	56	4	52
4	93	2	12	5	22	6	27	8	45	7	69	3	60	1	7	0	88	9	49
2	61	5	26	9	71	8	44	0	21	6	82	3	68	7	33	1	84	4	99

---

**1a33 30x10**

---

2	38	4	75	9	12	5	97	0	76	1	29	8	14	6	66	7	44	3	12
0	43	5	38	1	80	3	82	2	85	4	58	6	87	8	92	9	89	7	69
6	48	4	8	8	66	7	7	2	14	3	41	5	61	0	43	1	84	9	5
5	19	3	74	6	41	4	59	8	43	2	42	9	73	7	97	1	8	0	96
3	75	5	5	2	70	8	42	7	23	6	55	1	48	9	38	4	37	0	7
2	72	7	31	3	95	0	79	4	25	1	56	8	9	9	60	5	73	6	43
9	31	3	78	6	16	4	94	7	86	5	21	0	97	8	53	1	7	2	64
3	86	2	65	6	59	8	44	1	33	7	85	0	61	5	32	9	63	4	30
4	11	5	61	9	84	3	16	7	90	1	30	0	60	8	93	2	44	6	45
5	11	2	28	0	32	7	36	8	31	4	47	3	20	6	52	9	35	1	49
5	17	3	34	6	49	1	84	0	85	8	20	7	74	9	68	4	10	2	77
8	71	5	7	3	29	1	85	4	76	6	59	2	17	0	17	9	13	7	48
1	39	9	16	4	39	6	87	7	11	3	32	2	15	0	19	5	64	8	43
5	33	8	82	2	92	1	83	6	32	3	99	9	99	4	91	0	8	7	57
7	7	0	48	9	62	4	88	6	21	5	39	8	27	3	91	1	38	2	69
9	64	8	45	3	24	7	80	2	67	4	18	6	38	0	88	5	80	1	44
2	15	3	72	4	40	7	21	8	52	0	51	9	59	1	24	6	47	5	43
4	77	7	43	1	40	2	31	8	76	6	20	5	88	3	70	9	5	0	32
2	14	7	58	9	85	5	64	1	26	6	94	0	32	3	49	8	80	4	47
9	23	1	11	8	34	4	75	7	79	3	26	2	96	0	5	6	9	5	59
0	75	2	20	8	10	3	66	6	43	7	37	1	9	9	83	4	68	5	52
8	54	1	26	4	79	7	88	6	84	0	6	2	54	9	59	3	28	5	42
4	56	9	29	3	36	0	40	6	86	8	68	2	69	7	23	5	62	1	16
7	53	1	5	6	17	9	59	2	59	8	78	3	64	0	82	4	13	5	12
9	7	6	62	7	90	5	83	1	85	3	69	0	16	4	81	2	58	8	66
7	24	2	65	1	69	5	42	9	82	6	82	0	83	3	46	8	72	4	33
1	10	8	27	7	43	5	20	4	71	9	65	2	73	6	99	0	24	3	64

---

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

9 35 3 92 0 38 5 35 7 30 8 45 2 8 4 82 1 34 6 21  
 5 23 7 84 9 7 4 85 8 60 1 15 2 52 6 94 3 83 0 6  
 2 70 6 29 8 27 9 80 4 6 7 39 1 79 0 28 3 66 5 66

**1a34 30x10**

2 51 7 59 1 35 5 73 9 65 0 27 6 13 3 81 8 32 4 74  
 4 64 7 33 5 75 2 33 8 10 0 28 3 38 6 53 9 49 1 55  
 6 83 1 23 2 72 3 7 9 72 0 6 4 39 5 52 8 90 7 21  
 3 82 1 23 2 93 4 78 6 88 7 53 9 28 8 65 5 21 0 61  
 4 41 6 12 9 12 3 77 1 70 7 24 0 81 5 73 2 62 8 6  
 4 98 3 28 6 42 9 72 0 15 8 15 5 94 2 33 1 51 7 99  
 0 32 8 22 9 96 4 15 6 78 3 31 5 7 1 94 2 23 7 86  
 7 93 2 97 3 43 5 73 0 24 8 68 9 88 1 42 4 35 6 72  
 2 14 0 44 8 13 5 67 1 63 3 49 7 5 4 17 6 85 9 66  
 7 82 9 15 3 72 4 26 0 8 1 68 6 21 8 45 2 99 5 27  
 4 93 6 23 0 51 8 54 3 49 1 96 2 56 9 36 5 53 7 52  
 8 60 0 14 4 70 9 55 1 23 5 83 3 38 2 24 7 37 6 48  
 0 62 7 15 8 69 9 23 1 82 6 26 4 45 5 33 3 12 2 37  
 6 72 1 9 7 15 5 28 8 92 9 12 0 59 3 64 4 87 2 73  
 0 50 1 14 7 90 5 46 3 71 4 48 2 80 9 61 8 24 6 44  
 0 22 9 94 5 16 3 73 2 54 8 54 4 46 1 97 6 61 7 75  
 9 55 3 67 6 77 4 30 7 6 1 32 8 47 5 93 2 6 0 40  
 1 30 3 98 7 79 0 22 6 79 2 7 8 36 9 36 5 9 4 92  
 8 37 7 72 2 52 4 31 1 82 9 54 5 7 6 82 3 73 0 49  
 1 73 3 83 7 45 2 76 4 43 9 29 0 35 5 92 8 39 6 28  
 2 58 0 26 1 48 8 52 7 34 6 96 5 70 4 98 3 80 9 94  
 1 70 8 23 5 26 4 14 6 90 2 93 3 21 0 42 7 18 9 36  
 4 28 6 76 7 25 0 17 1 84 2 67 8 87 3 43 9 88 5 84  
 7 30 3 91 8 52 4 80 0 21 5 8 9 37 2 15 6 12 1 92  
 1 28 4 7 7 46 6 92 2 77 3 15 9 69 8 54 0 47 5 39  
 9 50 5 44 2 64 8 38 4 93 6 33 7 75 0 41 1 24 3 5  
 7 94 0 17 6 87 2 21 8 92 9 28 1 61 4 63 3 34 5 77  
 3 72 8 98 9 5 4 28 2 9 5 95 6 64 1 43 0 50 7 96  
 0 85 2 85 8 39 1 98 7 24 3 71 5 60 4 55 9 22 6 35  
 3 78 6 49 2 46 1 11 0 90 5 20 9 34 7 6 4 70 8 74

**1a35 30x10**

0 66 2 84 3 26 7 29 9 94 6 98 8 7 5 98 1 45 4 43  
 3 32 0 97 6 55 2 88 8 93 9 88 1 20 4 50 7 17 5 5  
 4 43 3 68 8 47 9 68 1 57 6 20 5 81 2 60 7 94 0 62  
 1 57 5 40 0 78 6 9 2 49 9 17 3 32 4 30 8 87 7 77  
 0 52 4 30 3 48 5 48 1 26 9 17 6 93 8 97 7 49 2 89  
 7 95 0 33 1 5 6 17 5 70 3 57 4 34 2 61 8 62 9 39  
 7 97 5 92 1 31 8 5 2 79 4 5 3 67 0 5 9 78 6 60  
 2 79 4 6 7 20 8 45 6 34 3 24 9 26 5 68 1 16 0 46  
 7 58 9 50 2 19 8 93 6 49 3 25 5 85 4 50 0 93 1 26  
 9 81 6 71 5 7 1 39 2 16 8 42 0 71 4 84 3 56 7 99  
 8 9 0 86 9 6 3 71 6 97 5 85 4 16 2 42 7 81 1 81  
 4 72 3 24 0 30 8 56 2 43 1 61 7 82 6 40 5 59 9 43  
 9 43 1 13 6 70 7 93 0 95 8 12 4 15 2 78 5 97 3 14  
 0 14 6 26 1 71 3 46 8 80 5 31 4 37 9 27 7 92 2 67  
 2 12 0 43 5 96 6 7 3 45 7 20 1 13 9 29 4 60 8 33  
 1 78 5 50 6 84 0 42 8 84 4 30 9 76 2 57 7 87 3 59  
 4 49 7 50 1 15 8 13 0 93 6 50 9 32 5 59 3 10 2 35  
 1 25 0 47 7 60 8 33 4 53 5 37 9 73 2 22 3 87 6 79  
 0 84 6 83 1 71 5 68 9 89 8 11 3 60 4 50 2 33 7 97  
 1 14 0 38 6 88 5 5 4 77 7 92 8 24 2 73 9 52 3 71  
 7 62 9 19 6 38 3 15 8 64 2 64 4 8 1 61 0 19 5 33  
 2 33 5 46 4 74 0 56 6 84 9 83 8 19 7 8 3 32 1 97  
 4 50 3 71 6 50 2 97 9 8 0 17 7 19 8 92 5 54 1 52  
 8 32 1 79 3 97 5 38 9 49 4 76 6 76 0 56 2 78 7 54

ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

5 13 3 5 2 25 0 86 1 95 9 28 6 78 8 24 7 10 4 39  
 7 48 2 59 0 20 9 7 5 31 6 97 1 89 4 32 3 25 8 41  
 5 87 0 18 9 48 2 43 1 30 6 97 7 47 8 65 3 69 4 27  
 6 71 5 20 8 20 1 78 3 39 0 17 7 50 2 44 9 42 4 38  
 0 50 9 42 3 72 5 7 1 77 7 58 4 78 2 89 6 70 8 36  
 3 32 9 95 2 13 0 73 6 97 8 24 4 49 5 57 1 68 7 94

**1a36 15x15**

4 21 3 55 6 71 14 98 10 12 2 34 9 16 1 21 0 53 7 26 8 52 5 95 12 31 11 42 13 39  
 11 54 4 83 1 77 7 64 8 34 14 79 12 43 0 55 3 77 6 19 9 37 5 79 10 92 13 62 2 66  
 9 83 5 77 2 87 7 38 4 60 12 98 0 93 13 17 6 41 10 44 3 69 11 49 8 24 1 87 14 25  
 5 77 0 96 9 28 6 7 4 95 13 35 7 35 8 76 11 9 12 95 2 43 1 75 10 61 14 10 3 79  
 10 87 4 28 8 50 2 59 0 46 11 45 14 9 9 43 6 52 7 27 1 91 13 41 3 16 5 59 12 39  
 0 20 2 71 4 78 13 66 3 14 12 8 14 42 6 28 1 54 9 33 11 89 8 26 7 37 10 33 5 43  
 8 69 4 96 12 17 0 69 7 45 11 31 6 78 10 20 3 27 13 87 1 74 5 84 14 76 2 94 9 81  
 4 58 13 90 11 76 3 81 7 23 9 28 1 18 2 32 12 86 8 99 14 97 0 24 10 45 6 72 5 25  
 5 27 1 46 6 67 8 27 13 19 10 80 2 17 3 48 7 62 11 12 14 28 4 98 0 42 9 48 12 50  
 11 37 5 80 4 75 8 55 7 50 0 94 9 14 6 41 14 72 3 50 10 61 13 79 2 98 12 18 1 63  
 7 65 3 96 0 47 4 75 12 69 14 58 10 33 1 71 9 22 13 32 5 57 8 79 2 14 11 31 6 60  
 1 34 2 47 3 58 5 51 4 62 6 44 9 8 7 17 10 97 8 29 11 15 13 66 12 40 0 44 14 38  
 3 50 7 57 13 61 5 20 11 85 12 90 2 58 4 63 10 84 1 39 9 87 6 21 14 56 8 32 0 57  
 9 84 7 45 5 15 14 41 10 18 4 82 11 29 2 70 1 67 3 30 13 50 6 23 0 20 12 21 8 38  
 9 37 10 81 11 61 14 57 8 57 0 52 7 74 6 62 12 30 1 52 2 38 13 68 4 54 3 54 5 16

**1a37 15x15**

5 19 6 64 11 73 9 13 2 84 14 88 3 85 10 41 12 53 13 80 1 66 7 46 8 59 4 25 0 62  
 1 67 3 74 7 41 2 57 14 52 0 14 9 64 8 84 6 78 5 47 13 28 4 84 10 63 12 26 11 46  
 6 97 8 95 0 64 9 38 10 59 12 95 2 17 11 65 13 93 3 10 5 73 1 11 4 85 14 46 7 67  
 10 23 12 49 3 32 4 66 2 43 0 60 8 41 7 61 13 70 9 49 11 17 6 90 1 85 14 99 5 85  
 9 98 8 57 3 73 6 9 0 73 7 7 1 98 4 13 13 41 5 40 11 85 10 37 2 68 14 79 12 17  
 11 66 7 53 5 86 6 40 0 14 3 19 13 96 4 95 2 54 10 84 12 97 8 16 14 52 1 76 9 87  
 4 77 2 55 9 42 5 74 14 91 13 33 10 16 12 54 0 18 3 87 7 60 8 13 6 33 1 33 11 61  
 6 41 5 39 11 82 9 64 14 47 10 28 7 78 13 49 1 79 4 58 2 92 3 79 12 6 0 69 8 76  
 11 21 5 42 9 91 2 28 0 52 6 88 12 76 13 86 10 23 1 35 7 52 4 91 3 47 14 82 8 24  
 11 42 1 93 3 95 13 45 9 28 14 77 0 84 10 8 7 45 4 70 5 37 6 86 12 64 8 67 2 38  
 4 97 12 81 1 58 7 84 5 58 0 9 11 87 3 5 2 44 13 85 6 89 10 77 9 96 14 39 8 77  
 12 80 1 21 10 10 5 73 8 70 6 49 2 31 13 34 4 40 11 22 0 15 14 82 3 57 9 71 7 48  
 2 17 7 62 5 75 9 35 1 91 14 50 3 7 10 64 13 75 12 94 0 55 6 72 8 47 4 11 11 90  
 11 93 6 57 1 71 12 70 9 93 5 20 3 15 13 77 10 58 0 12 2 67 8 68 14 7 7 29 4 52  
 13 76 3 27 4 26 9 36 11 8 10 36 0 95 8 48 2 82 6 87 5 6 1 63 7 56 12 36 14 15

**1a38 15x15**

1 26 12 67 0 72 6 74 14 13 8 43 4 30 3 19 10 23 11 85 5 98 13 43 2 38 7 8 9 75  
 14 42 0 39 4 55 12 46 1 19 8 93 9 80 5 26 10 7 6 50 11 57 3 73 2 9 7 61 13 72  
 3 96 4 99 12 34 6 60 7 43 14 7 13 12 8 11 11 70 10 43 0 91 1 68 9 11 5 68 2 72  
 14 63 11 45 4 49 1 74 8 27 0 30 9 72 7 9 12 99 13 60 5 69 6 69 2 84 3 40 10 59  
 2 91 0 75 9 98 3 17 10 72 13 31 11 9 14 98 7 50 5 37 4 8 8 65 1 90 12 91 6 71  
 11 35 6 80 4 39 3 62 14 74 5 72 10 35 9 25 1 49 8 52 7 63 2 90 13 21 12 47 0 38  
 14 19 7 57 10 24 13 91 3 50 0 5 11 49 12 18 9 58 5 24 8 52 1 88 2 68 6 20 4 53  
 7 77 14 72 5 35 11 90 4 68 6 18 3 9 0 33 8 60 10 18 12 10 13 60 1 38 2 99 9 15  
 13 6 8 86 2 40 9 79 12 92 11 23 5 89 10 95 6 91 7 72 0 80 1 60 3 56 4 51 14 23  
 1 46 6 28 5 34 11 77 4 47 0 10 14 49 8 77 10 48 7 24 12 8 2 72 13 55 9 29 3 40  
 10 22 4 89 12 79 0 7 9 15 1 6 11 30 6 38 5 11 8 52 3 20 7 5 14 9 2 20 13 28  
 5 73 14 56 2 37 3 22 13 25 6 58 1 8 7 93 4 88 8 17 12 9 11 69 10 71 9 85 0 55  
 9 85 14 58 3 46 8 64 2 49 6 37 1 33 4 30 5 26 0 20 13 74 10 77 12 99 11 56 7 21  
 10 17 3 24 4 89 5 15 11 60 1 42 8 98 2 64 13 92 0 63 7 52 12 54 6 75 14 23 9 38  
 3 8 5 17 11 56 7 93 14 26 9 62 6 7 10 88 0 97 1 7 2 43 8 29 13 35 12 87 4 57

**1a39 15x15**

10 51 14 43 7 80 4 18 6 38 3 24 2 67 12 15 11 24 13 72 8 45 5 80 9 64 1 44 0 88



ANEXO 2: BEASLEY'S OR-LIBRARY: FT06, FT10 Y FT20, Y LA01 AL LA40

---

6	40	9	88	10	77	5	59	11	20	3	52	8	70	0	40	4	32	13	76	12	43	7	31	2	21	14	5	1	47
0	32	3	49	10	5	5	64	7	58	8	80	6	94	11	11	1	26	13	26	14	59	9	85	4	47	12	96	2	14
5	23	6	9	0	75	12	37	11	43	2	79	4	75	3	34	7	20	13	10	14	83	10	68	9	52	8	66	1	9
12	69	9	59	3	28	14	62	13	36	1	26	6	84	11	16	8	54	5	42	2	54	0	6	10	40	7	88	4	79
13	78	12	53	11	17	5	29	4	82	2	23	9	12	8	64	1	86	7	59	6	5	3	68	14	59	10	13	0	56
10	83	13	46	9	7	12	65	11	69	6	62	0	16	2	58	8	66	5	83	7	90	14	42	4	81	3	69	1	85
7	73	10	71	8	64	6	10	9	20	11	99	4	24	14	65	5	82	3	72	12	43	1	82	13	27	2	24	0	33
4	82	1	34	3	92	2	8	0	38	8	45	6	21	5	35	12	52	9	35	11	15	14	23	10	6	13	83	7	30
2	84	5	7	9	66	10	6	4	28	13	27	6	79	7	70	0	85	1	94	3	60	14	80	12	39	8	66	11	29
3	44	6	58	13	14	8	65	1	72	5	14	12	52	4	21	9	25	0	5	11	51	7	61	14	55	10	42	2	36
14	43	10	72	5	78	11	12	12	17	0	46	9	27	6	51	2	63	1	79	8	79	7	91	4	49	13	26	3	93
7	49	0	49	4	71	5	78	9	44	10	41	12	91	13	84	8	91	6	21	11	47	14	28	3	61	2	70	1	93
3	25	4	85	0	66	2	45	10	95	12	21	8	84	5	24	9	53	7	67	6	91	11	11	13	32	1	30	14	89
3	92	7	93	0	99	1	40	10	37	12	69	5	66	6	57	14	22	9	44	8	73	13	97	11	18	2	69	4	41

---

**1a40 15x15**

---

9	65	10	28	4	74	12	33	2	51	14	75	5	73	8	32	6	13	3	81	1	35	7	59	13	38	11	55	0	27
0	64	1	53	11	83	2	33	4	6	9	52	14	72	8	7	13	90	12	21	6	23	3	10	10	39	5	49	7	72
14	73	3	82	1	23	12	62	6	88	5	21	8	65	11	70	7	53	10	81	2	93	13	77	0	61	9	28	4	78
1	12	6	51	7	33	4	15	14	72	10	98	9	94	5	12	11	42	2	24	13	15	8	28	3	6	12	99	0	41
12	97	5	7	9	96	4	15	14	73	13	43	0	32	8	22	11	42	1	94	2	23	7	86	6	78	10	24	3	31
1	72	5	88	2	93	13	13	4	44	14	66	6	63	7	14	9	67	10	17	11	85	0	35	3	68	12	5	8	49
9	15	7	82	6	21	14	53	3	72	13	49	2	99	4	26	12	56	8	45	1	68	10	51	0	8	5	27	11	96
3	54	7	24	4	14	8	38	5	36	2	52	14	55	12	37	11	48	0	93	13	60	10	70	1	23	6	23	9	83
3	12	8	69	6	26	9	23	14	28	1	82	5	33	4	45	13	64	7	15	11	9	12	73	10	59	2	37	0	62
0	87	5	12	7	80	4	50	10	48	12	90	1	72	13	24	6	14	8	71	11	44	9	46	2	15	14	61	3	92
2	54	0	22	6	61	4	46	3	73	5	16	12	6	9	94	14	93	13	67	8	54	7	75	11	32	10	40	1	97
10	92	14	36	4	22	9	9	3	47	1	77	12	79	13	36	6	30	8	98	11	79	7	7	5	55	2	6	0	30
0	49	13	83	3	73	6	82	1	82	14	92	11	73	4	31	10	35	9	54	5	7	8	37	7	72	2	52	12	76
10	98	12	34	13	52	4	26	1	28	3	39	8	80	5	29	9	70	0	43	6	48	7	58	2	45	14	94	11	96
1	70	10	17	6	90	12	67	4	14	8	23	3	21	7	18	13	43	11	84	5	26	9	36	2	93	14	84	0	42

---

## PUBLICACIONES

### REVISTAS INDEXADAS EN ISI, SCOPUS Y LATINDEX

**M. Frutos, A. C. Olivera, F. Tohmé.** “A memetic algorithm based on a NSGAI scheme for the flexible job-shop scheduling problem”. *Annals of Operations Research*. Springer Netherlands. 0254-5330 (Print) 1572-9338 (Online). DOI 10.1007/s10479-010-0751-9. Published online 14/05/2010.

**A. C. Olivera, M. Frutos, J. A. Carballido, I. Ponzoni, N. B. Brignole.** “Bus network scheduling problem: GRASP + EAs with PISA \* Simulation”. 10<sup>th</sup> International Work-Conference on Artificial Neural Networks (IWANN 2009). 10 al 12 de Junio de 2009. Salamanca. España. Organizado por Spanish Chapter of the IEEE Computational Intelligence Society, Universidad de Salamanca, Universitat Politècnica de Catalunya, Universidad de Málaga, Universidad de Granada. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag. IWANN 2009, Part I, LNCS 5517, pp. 1272/1279. 2009.

**A. C. Olivera, M. Frutos, J. A. Carballido, N. B. Brignole.** “Bus network optimization with a time-dependent hybrid algorithm”. *J.UCS Journal of Universal Computer Science*, Graz University of Technology, and supported by the KNOW Center and University of Applied Sciences. Vol. 14 (15). pp. 2512/2531. ISSN: 0948 695x, OnLínea Edition ISSN: 0948 6968 [http://www.jucs.org/jucs\\_14\\_15/bus\\_network\\_optimization\\_with](http://www.jucs.org/jucs_14_15/bus_network_optimization_with). 2008. Trabajo extendido al presentado en el 7<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Systems Engineering and Applications ISDA (2007).

**R. Casal, M. Frutos, A. Claverie.** “Un sistema de apoyo a la decisión en la gestión logística de una PyME”. Revista de Investigación Operativa de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa. Vol. 27. pp. 109/121. ISSN: 0329 7322. Noviembre de 2006. Editada por el Departamento de Impresiones y Publicaciones de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

### **CONGRESOS Y REUNIONES CIENTÍFICAS INTERNACIONALES**

**M. Frutos, F. Tohmé.** “Multi-objective optimization in job-shop-like production processes”. In Proceedings del II Latinamerican Workshop on Optimization and Control. 20 al 22 de Julio de 2010. Rosário. Argentina.

**M. Frutos, F. Tohmé F., G. Winter Althaus.** “A study of the flexible job-shop scheduling problem with memetic algorithms”. In Proceedings del XX Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa. 06 al 09 de Junio de 2010. Buenos Aires. Argentina.

**F. A. Pérez Servello, R. Casal, M. Frutos.** “Inverse logistics: modeling multi-product flows with recovery of containers”. In Proceedings del XX Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa. 06 al 09 de Junio de 2010. Buenos Aires. Argentina.

**M. Frutos.** “Evolutionary techniques in multi-objective optimization problems in large-scale industrial environments”. In Proceedings de la XIV Escuela Latino-americana de Verano de Investigación de Operaciones. ISBN: 978 978 607 7834 021. 9 al 14 de Agosto de 2009. El Fuerte. México.

**A. C. Olivera, M. Frutos, J. A. Carballido, N. B. Brignole.** “GRASP + SPEA2 \* Simulation = Allocation and scheduling of bus-networks in urban areas”. In Proceedings de la 24<sup>th</sup> Conference on System Modelling and Optimization (24<sup>th</sup> IFIP TC7). Organizado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación. 27 al 31 de Julio de 2009. Buenos Aires. Argentina.

**M. Frutos, A. C. Olivera, F. Tohmé.** “A hybrid technique for handling the flexible job-shop scheduling problem”. In Proceedings de la 24<sup>th</sup> Conference on System Modelling and Optimization (24<sup>th</sup> IFIP TC7). Organizado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación. 27 al 31 de Julio de 2009. Buenos Aires. Argentina.

**M. Frutos, A. C. Olivera.** “Job-shop scheduling problem: desarrollo de un procedimiento eficiente”. In Proceedings del XIV Congreso Latino Iberoamericano en Investigación de Operaciones (XIV CLAIO). ISBN: 978 958 825283 4. Organizado por la Asociación Latino-Iberoamericana de Investigación Operativa. 9 al 12 de Septiembre de 2008. Cartagena de Indias. Colombia.

**M. Frutos, A. C. Olivera.** “Vehicle sequencing problem: una técnica híbrida para el ROADEF'05 challenge”. In Proceedings del XIV Congreso Latino Iberoamericano en Investigación de Operaciones (XIV CLAIO). ISBN: 978 958 825283 4. Organizado por la Asociación Latino-Iberoamericana de Investigación Operativa. 9 al 12 de Septiembre de 2008. Cartagena de Indias. Colombia.

**A. C. Olivera, M. Frutos, J. A. Carballido, N. B. Brignole.** “Bus network optimization through time-dependent hybrid algorithm”. In Proceedings de la VII International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2007) (Vol. 0. ISBN: 0 7695 2976 3. pp. 857/862. Publisher IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA. 2007). 22 al 24 de Octubre de 2007. Rio de Janeiro. Brasil.

**M. Frutos, A. C. Olivera, R. Casal.** “Algoritmo híbrido para un enfoque alternativo al job-shop scheduling problem”. In Proceedings de la XIII International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (XIII ICIEOM) y el XXVII Encuentro Nacional Engenharia de Produção (XXVII ENEGEP). Organizado por Brazilian Association of Production Engineering (ABEPRO). ISBN: 97885 88478 33 6. 9 al 11 de Octubre de 2007. Foz do Iguazú. Brasil.

**M. Frutos, A. C. Olivera.** “Estrategia meta-heurística híbrida aplicada a la programación

operacional”. In Proceedings del II Congresso da Academia Trinacional de Ciências (C3N 2007). ISSN: 1982 2758. 8 al 11 de Octubre de 2007. Foz do Iguazú. Brasil.

**A. C. Olivera, M. Frutos, R. Casal.** “Métodos para determinar secuencias de producción en un ambiente productivo complejo”. In Proceedings del XIII Congreso Latino Iberoamericano de Investigación Operativa (XIII CLAIO). ISBN 9974 7699 7 3. 27 al 30 de Noviembre de 2006. Montevideo. Uruguay.

**M. Frutos, R. Casal, A. C. Olivera.** “Estudio sobre distintas estrategias utilizadas para establecer secuencias detalladas en entornos productivos”. In Proceedings del XII International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (XII ICIEOM) y el XXVI Encuentro Nacional Engenharia de Produção (XXVI ENEGEP). ISBN: 85 88478 21 8. Organizado por Brazilian Association of Production Engineering (ABEPRO). 9 al 11 de Octubre de 2006. Fortaleza. Brasil.

**R. Casal, M. Frutos, R. Corral, N. López.** “Un estudio de procedimientos utilizados para la resolución de problemas de distribución de mercancías”. In Proceedings del I Congreso Latinoamericano de Producción, Logística y Operaciones (I CLPLO) y XXIII Encuentro Nacional de Docentes Administración de Producción, Logística y Operaciones (XXIII ENDAPLO). 5 al 7 de Octubre de 2006. Buenos Aires. Argentina.

### **CONGRESOS Y REUNIONES CIENTÍFICAS NACIONALES**

**M. A. Viceconte, R. Duran, I. Ponzoni, M. Frutos.** “Modelado de un sistema logístico de abastecimiento de cargas”. In Proceedings del VIII Congreso Chileno de Investigación Operativa (OPTIMA 2009). ISBN: 978 956 332 163 0. Organizado por la Asociación Latino-Iberoamericana de Investigación Operativa. 7 al 10 de Octubre de 2009. Termas de Chillán. Chile.

**M. Frutos, R. Casal, R. Corral, N. López.** “Un enfoque basado en jumping gene genetic algorithm para el job-shop scheduling problem”. In Proceedings del VIII Congreso Chileno de Investigación Operativa (OPTIMA 2009). ISBN: 978 956 332 163 0. Organizado por la

Asociación Latino-Iberoamericana de Investigación Operativa. 7 al 10 de Octubre de 2009. Termas de Chillán. Chile.

**M. Frutos.** “Algoritmos evolutivos (JGGA\*NSGAI) en problemas de secuenciación de tareas”. In Proceedings de la XXXVIII Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO), Simposio de Investigación Operativa (SIO). ISBN: 1850 2865. 24 al 28 de Agosto de 2009. Mar del Plata. Argentina.

**M. Frutos, F. Tohmé.** “Scheduling in transport networks: models, solutions and evaluation”. In Proceedings del Location and Network Design Workshop (LAND 2009). 22 al 25 de Marzo de 2009. Pucón. Chile.

**M. Frutos, F. Tohmé.** “Desarrollo de un procedimiento genético diseñado para programar la producción en un sistema de manufactura tipo job-shop”. In Proceedings del VI Congreso Español sobre Meta-heurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2007). ISBN: 84 691 68 5. Organizado por la Universidad de Málaga. 11 al 13 de Febrero de 2009. Málaga. España.

**R. Casal, A. Di Nardo, M. Frutos.** “Aplicación de técnicas de decisión multi-criterio en la localización de contenedores peligrosos”. In Proceedings del II Congreso Argentino de Ingeniería Industrial (COINI 2008). ISBN: 0774 887 87876 1 9. Organizado por el Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA). 27 al 28 de Octubre de 2008. Buenos Aires. Argentina.

**R. Corral, N. López, M. Frutos.** “Análisis y desarrollo de estructuras de planificación en empresas de la zona de Bahía Blanca”. In Proceedings del II Congreso Argentino de Ingeniería Industrial (COINI 2008). ISBN: 0774 887 87876 1 9. Organizado por el Instituto Tecnológico Buenos Aires (ITBA). 27 al 28 de Octubre de 2008. Buenos Aires. Argentina.

**M. Frutos, A. C. Olivera, R. Casal.** “Combine meta-heuristics for treatment of production complex problem”. In Proceedings del I Congreso Argentino de Ingeniería Industrial (COINI 2007). ISBN: 0978 987 98835 1 8. Organizado por Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda (UTN FRA) y Universidad Nacional de la Matanza (UNLaM).

1 al 2 de Noviembre de 2007. Buenos Aires. Argentina.

**A. C. Olivera, M. Frutos, N. B. Brignole, R. Casal.** “Evaluación del sistema de transporte público urbano mediante simulación de entornos dinámicos”. In Proceedings del VII Congreso Chileno de Investigación Operativa (OPTIMA 2007). Organizado por la Asociación Latino-Iberoamericana de Investigación Operativa. 21 al 23 de Noviembre de 2007. Puerto Montt. Chile.

**M. Frutos, A. C. Olivera, R. Casal.** “Algoritmo híbrido aplicado al job-shop scheduling problem”. In Proceedings del VII Congreso Chileno de Investigación Operativa (OPTIMA 2007). Organizado por la Asociación Latino-Iberoamericana de Investigación Operativa. 21 al 23 de Noviembre de 2007. Puerto Montt. Chile.

**A. C. Olivera, M. Frutos, J. A. Carballido, N. B. Brignole.** “GRASP initialization stage for bus-network hybrid algorithm”. In Proceedings de la XXXVI Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO), Simposio de Investigación Operativa (SIO). ISSN: 1850 2776. 27 al 28 de Agosto de 2007. Mar del Plata. Argentina.

**M. Frutos, R. Casal, A. C. Olivera.** “Algoritmo híbrido estocástico aplicado al diseño de rutas y determinación de frecuencias en el transporte público urbano”. In Proceedings del V Congreso Español sobre Meta-heurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2007). ISBN: 978 84 690 3470 5. Organizado por Universidad de La Laguna. 14 al 16 de Febrero de 2007. Puerto de la Cruz. Tenerife. España.

**A. C. Olivera, M. Frutos, R. Casal.** “Algoritmos genéticos: una estrategia clave para abordar problemas de secuenciamiento en gran escala”. In Proceedings de las XXXV Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO), Jornadas de Informática Industrial (JII). ISSN 1850-2849. 4 al 5 de Septiembre de 2006. Mendoza. Argentina.

**M. Frutos, A. C. Olivera.** “Logística urbana: interpretación, modelado, resolución y evaluación”. In Proceedings del IV Congreso de Estudiantes de Ingeniería Industrial (CAEII

2006). 18 al 20 de Agosto de 2006. Bahía Blanca. Argentina.

**R. Casal, M. Frutos, A. Toncovich, N. López, R. Corral.** “Resolución de problemas de distribución mediante el empleo de estrategias heurísticas”. In Proceedings del VI Congreso Chileno de Investigación Operativa (OPTIMA 2005). 24 al 27 de Octubre de 2005. Valdivia. Chile.

**R. Casal, M. Frutos, N. López, R. Corral.** “Resolución de problemas de incertidumbre en la cadena de abastecimiento mediante simulación”. In Proceedings del XVIII Encuentro Nacional de Docentes en Investigación Operativa (XVIII ENDIO) y XVI Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa (XVI EPIO). ISSN: 950 658 153 3. 23 al 25 de mayo de 2005. Córdoba. Argentina.



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIG. 1</b> PROCESO DE PLANIFICACIÓN, PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN	3
<b>FIG. 2</b> ESQUEMA DE REPRESENTACIÓN DEL CONJUNTO DE NODOS	27
<b>FIG. 3</b> LAS FLECHAS CONTINUAS MUESTRAN ELEMENTOS DEL CONJUNTO $\omega$	28
<b>FIG. 4</b> LAS FLECHAS PUNTEADAS MUESTRAN ELEMENTOS DEL CONJUNTO $\omega$	29
<b>FIG. 5</b> LAS FLECHAS CONTINUAS MUESTRAN ELEMENTOS DEL CONJUNTO $\omega$	29
<b>FIG. 6</b> LAS FLECHAS MUESTRAN EL CONJUNTO COMPLETO $\omega$	29
<b>FIG. 7</b> ERROR EN LA SELECCIÓN	30
<b>FIG. 8</b> CAMINO CRÍTICO	30
<b>FIG. 9</b> ESQUEMA GENERAL DE UN ALGORITMO GENÉTICO	33
<b>FIG. 10</b> FRENTES DE PARETO (SIN BÚSQUEDA LOCAL)	37
<b>FIG. 11</b> FRENTES DE PARETO (CON BÚSQUEDA LOCAL)	37
<b>FIG. 12</b> ESQUEMA GENERAL DE UN ALGORITMO MEMÉTICO	38
<b>FIG. 13</b> CROMOSOMA DEL INDIVIDUO	40
<b>FIG. 14</b> RANGO DE NO DOMINANCIA RI Y DISTANCIA DI	41
<b>FIG. 15</b> PROCESO DE CRUCE, P1 Y P2	42
<b>FIG. 16</b> PROCESO DE CRUCE, OFFSPRING (OPX, TPX, APX Y UX)	43
<b>FIG. 17</b> PROCESO DE MUTACIÓN, OFFSPRING (*)	43
<b>FIG. 18</b> SEUDO-CÓDIGO DEL ALGORITMO	44
<b>FIG. 19</b> FUNCIÓN PARA GENERAR EL ENTORNO, OFFSPRING (**)	48
<b>FIG. 20</b> SEUDO-CÓDIGO DEL ALGORITMO SA	48
<b>FIG. 21</b> ETAPA PREVIA A LA INICIALIZACIÓN DEL ALGORITMO	49
<b>FIG. 22</b> ESTRUCTURA DEL ALGORITMO	50

LISTA DE FIGURAS

---

<b>FIG. 23</b> VISIÓN INTEGRAL DEL ALGORITMO	51
<b>FIG. 24</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA01)	59
<b>FIG. 25</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA02)	59
<b>FIG. 26</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA03)	59
<b>FIG. 27</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA04)	60
<b>FIG. 28</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA05)	60
<b>FIG. 29</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA06)	60
<b>FIG. 30</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA07)	61
<b>FIG. 31</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA08)	61
<b>FIG. 32</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA09)	61
<b>FIG. 33</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (LA10)	62
<b>FIG. 34</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA01)	62
<b>FIG. 35</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA02)	62
<b>FIG. 36</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA03)	63
<b>FIG. 37</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA04)	63
<b>FIG. 38</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA05)	63
<b>FIG. 39</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA06)	64
<b>FIG. 40</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA07)	64
<b>FIG. 41</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA08)	64
<b>FIG. 42</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA09)	65
<b>FIG. 43</b> $Y_{NSGA}$ , $Y_{SPEA}$ , $Y_{SPEAII}$ E $Y_{(LS)NSGAI}$ , MAKESPAN VS. DELAY (LA10)	65
<b>FIG. 44</b> MÉTODO MONTE CARLO	76
<b>FIG. 45</b> MODELO DE SIMULACIÓN	77
<b>FIG. 46</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (EJEMPLO)	78
<b>FIG. 47</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA01)	79
<b>FIG. 48</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA02)	79
<b>FIG. 49</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA03)	79
<b>FIG. 50</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA04)	79
<b>FIG. 51</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA05)	80
<b>FIG. 52</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA06)	80

LISTA DE FIGURAS

<b>FIG. 53</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA07)	80
<b>FIG. 54</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA08)	80
<b>FIG. 55</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA09)	81
<b>FIG. 56</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (LA10)	81
<b>FIG. 57</b> ESQUEMA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO	82
<b>FIG. 58</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA01)	83
<b>FIG. 59</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA02)	83
<b>FIG. 60</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA03)	83
<b>FIG. 61</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA04)	84
<b>FIG. 62</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA05)	84
<b>FIG. 63</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA06)	84
<b>FIG. 64</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA07)	85
<b>FIG. 65</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA08)	85
<b>FIG. 66</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA09)	85
<b>FIG. 67</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (LA10)	86
<b>FIG. 68</b> CASO A: PRODUCTOS DE MADERA CON TERMINACIÓN EN LACA	89
<b>FIG. 69</b> CASO A: PRODUCTOS DE MADERA CON TERMINACIÓN EN LACA (LAY-OUT)	92
<b>FIG. 70</b> CASO A: PRODUCTOS DE MADERA CON TERMINACIÓN EN LACA (SCHEDULING)	93
<b>FIG. 71</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (CASO A)	93
<b>FIG. 72</b> MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (CASO A)	94
<b>FIG. 73</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (CASO A)	94
<b>FIG. 74</b> CASO B: PRODUCTOS PRE-FABRICADOS DE HORMIGÓN	96
<b>FIG. 75</b> CASO B: PRODUCTOS PRE-FABRICADOS DE HORMIGÓN (LAY-OUT)	98
<b>FIG. 76</b> CASO B: PRODUCTOS PRE-FABRICADOS DE HORMIGÓN (SCHEDULING)	100
<b>FIG. 77</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (CASO B)	100
<b>FIG. 78</b> MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (CASO B)	101
<b>FIG. 79</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (CASO B)	101
<b>FIG. 80</b> CASO C: PRODUCTOS DE MARMOL	103
<b>FIG. 81</b> CASO C: PRODUCTOS DE MARMOL (LAY-OUT)	105
<b>FIG. 82</b> CASO C: PRODUCTOS DE MARMOL (SCHEDULING)	107

LISTA DE FIGURAS

---

<b>FIG. 83</b> DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DEL MAKESPAN (CASO C)	107
<b>FIG. 84</b> MAKESPAN VS. MEAN FLOW TIME (CASO C)	108
<b>FIG. 85</b> FRENTE DE PARETO CON INFORMACIÓN DE VARIABILIDAD DEL MAKESPAN (CASO C)	108

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1</b> DATOS INICIALES DEL JSSP (EJEMPLO)	20
<b>TABLA 2</b> ESPACIO DE SOLUCIONES FACTIBLES DEL JSSP (EJEMPLO)	21
<b>TABLA 3</b> RESULTADOS PARA FT06, FT10, FT20 Y LA01	53
<b>TABLA 4</b> RESULTADOS PARA LA02, LA03, LA04 Y LA05	54
<b>TABLA 5</b> RESULTADOS PARA LA06, LA07, LA08 Y LA09	54
<b>TABLA 6</b> RESULTADOS PARA LA10, LA11, LA12 Y LA13	54
<b>TABLA 7</b> RESULTADOS PARA LA14, LA15, LA16 Y LA17	55
<b>TABLA 8</b> RESULTADOS PARA LA18, LA19, LA20 Y LA21	55
<b>TABLA 9</b> RESULTADOS PARA LA22, LA23, LA24 Y LA25	55
<b>TABLA 10</b> RESULTADOS PARA LA26, LA27, LA28 Y LA29	56
<b>TABLA 11</b> RESULTADOS PARA LA30, LA31, LA32 Y LA33	56
<b>TABLA 12</b> RESULTADOS PARA LA34, LA35, LA36 Y LA37	56
<b>TABLA 13</b> RESULTADOS PARA LA38, LA39 Y LA40	57
<b>TABLA 14</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA01)	67
<b>TABLA 15</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA02)	67
<b>TABLA 16</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA03)	67
<b>TABLA 17</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA04)	67
<b>TABLA 18</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA05)	68
<b>TABLA 19</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA06)	68
<b>TABLA 20</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA07)	68
<b>TABLA 21</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA08)	68
<b>TABLA 22</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA09)	69
<b>TABLA 23</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA10)	69

---

LISTA DE TABLAS

---

<b>TABLA 24</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA01)	70
<b>TABLA 25</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA02)	70
<b>TABLA 26</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA03)	71
<b>TABLA 27</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA04)	71
<b>TABLA 28</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA05)	71
<b>TABLA 29</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA06)	71
<b>TABLA 30</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA07)	72
<b>TABLA 31</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA08)	72
<b>TABLA 32</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA09)	72
<b>TABLA 33</b> COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES Y ANÁLISIS DE DOMINANCIA (LA10)	72
<b>TABLA 34</b> DATOS INICIALES DEL JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (CASO: A)	92
<b>TABLA 35</b> DATOS INICIALES DEL JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (CASO: B)	99
<b>TABLA 36</b> DATOS INICIALES DEL JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEM (CASO: C)	106