UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Mejora de tiempos de entrega en un *flow shop* híbrido flexible usando técnicas inteligentes. Aplicación en la industria de tejidos técnicos

Jaime Antero Arango Marín

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia
2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Improving delivery times in a hybrid flexible flow shop using smart techniques. Application in technical textiles industry

Jaime Antero Arango Marín

Universidad Nacional de Colombia
Faculty of Engineering and Architecture, Department of Industrial Engineering
Manizales, Colombia
2016

Mejora de tiempos de entrega en un *flow shop* híbrido flexible usando técnicas inteligentes. Aplicación en la industria de tejidos técnicos

Jaime Antero Arango Marín

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ingeniería

Director (a):
Doctor Jaime Alberto Giraldo García
Codirector (a):
Ph. D. Omar Danilo Castrillón Gómez

Línea de Investigación:
Industria y Organizaciones
Grupo de Investigación:
Innovación y Desarrollo Tecnológico

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia
2016

"Los científicos de hoy han substituido los experimentos por matemáticas, y vagan de ecuación en ecuación, y, finalmente, construyen una estructura que no tiene ninguna relación con la realidad."

Nikola Tesla

A mi esposa y a mis hijos por su paciencia y su apoyo.

Agradecimientos

El autor reconoce la guía y orientación del Doctor Jaime Alberto Giraldo García como director de su proceso de doctorado así como el acompañamiento del Doctor Omar Danilo Castrillón Gómez en calidad de co-director. Igualmente se valoran los aportes a este trabajo de los Magister Juan Camilo López Vargas y Ángela González Palacio, que desarrollaron como trabajos finales de su maestría, elementos parciales de solución al problema de investigación. También cabe destacar el trabajo de la Ingeniera Mónica Marcela Ramírez Pimiento, quién como trabajo de grado de pregrado clasificó los antecedentes bibliográficos para la construcción del estado del arte, así como el aporte de la Ingeniera Deisy Yesenia Cardona Cundar con su trabajo de grado de pregrado consistente en encontrar las empresas donde debía aplicarse el trabajo de campo; y la labor de la Ingeniera Laura Fernanda Ramírez Mejía, como estudiante auxiliar, documentando los productos de software y haciendo los contactos para el trabajo de campo.

El autor quiere agradecer en forma especial los comentarios y aportes de los Doctores William Ariel Sarache Castro, José Adalberto Soto Mejía, Diana María Cárdenas Aguirre y Yasel José Costa Salas, en calidad de jurados evaluadores del examen de calificación y la tesis de doctorado. Sus acertadas y constructivas opiniones fueron determinantes para la calidad del producto final de la investigación

Se reconoce, de igual manera, el apoyo de la Dirección de Investigaciones y Extensión de la sede Manizales DIMA, dentro de la Convocatoria de apoyo a tesis de posgrado-DIMA 2012. Proyecto Hermes 15917.

Resumen

Se busca aportar herramientas útiles para la programación de producción en la industria de tejidos técnicos. Se parte de las condiciones actuales de la programación de producción en este tipo de industria y de los antecedentes en la literatura científica sobre modelos aplicables a estos entornos. Se propone un modelo de solución por técnicas inteligentes a la problemática de la secuenciación y asignación de tareas en los entornos *flow shop* híbrido flexible considerando situaciones como: paralelismo entre máquinas no relacionadas, tiempos de montaje dependientes de la secuencia, entrada dinámica de trabajos, restricción de elegibilidad, maleabilidad y lotes de transferencia variables entre etapas. De allí se construye la propuesta de solución que involucra simultáneamente todas las condiciones de entorno real mencionadas y aplica un algoritmo genético modificado de acuerdo a las características del problema. Se concluye que el modelado considerando condiciones realistas es posible, que los algoritmos genéticos son una opción práctica para entornos reales y que las empresas pueden obtener mejoras en su capacidad de respuesta con este tipo de soluciones.

Palabras clave: Secuenciación de tareas, Industria Textil, Algoritmos Genéticos, Tejidos Técnicos, *Flow shop*

Abstract

It seeks to provide useful tools for production scheduling in the technical textiles industry. It begins in the current conditions of production scheduling in this type of industry and the background in scientific literature, applicable to these environments models. The mathematical model to solve the problem of sequencing and assigning jobs in Flexible hybrid *flow shop* environments is developed considering: unrelated parallel machines, sequence dependent setup time, dynamic entry of jobs, availability constrain, malleability and variable transfer batches between stages. The solution proposal is build including all actual environment features considered together and applying a modified genetic algorithm modeled according to the problem. It is concluded that the model of scheduling problems considering realistic conditions is possible, that genetic algorithms are a practical option for real environments, and that companies can achieve improvements in their responsiveness with this kind of solutions.

Keywords: task scheduling, textile industry, genetic algorithms, Technical textiles, *flow shop*

Contenido

Pág.

0. Introducción 4
0.1 Problema de investigación 7
0.2 Objetivos 8
0.2.1 Objetivo General 8
0.2.2 Objetivos Específicos 8
0.3 Hipótesis 9
0.4 Alcance y Limitaciones 9
0.5 Metodología 10
0.6 Productos obtenidos 10
0.6.1 Generación de nuevo conocimiento 10
0.6.2 Productos de Software 11
0.6.3 Apropiación Social del Conocimiento 11
0.6.3.1 Ponencias presentadas en eventos académicos en el área del proyecto: 11
0.6.3.2 Artículos para revistas indexadas 13
0.6.3.3 Distinciones 14
0.6.3.4 Trabajos de Grado de pregrado 14
0.6.3.5 Tesis de Maestría 14
0.6.3.6 Tesis de doctorado en Ingeniería (Línea de Investigación en Industria y Organizaciones). 14
0.7 Esquema general de la tesis: 15

1. Antecedentes Contextuales y Teóricos 17
1.1 Industria de Tejidos Técnicos 17
1.1.1 Descripción General de la Industria de Tejidos Técnicos 17
1.1.1.1 Materias Primas 18
1.1.1.2 Productos 18
1.1.1.3 Proceso General 18
1.1.1.3.1 Preparación de Hilaza 18
1.1.1.3.2 Urdizaje 19
1.1.1.3.3 Remetido 19
1.1.1.3.4 Tejeduría 19
1.1.1.3.5 Acabados 19
1.1.2 La Industria de Tejidos Técnicos en Colombia 20

1.1.2.1 Las variables a optimizar en la programación de producción de la Industria de Tejidos Técnicos en Colombia 21
1.1.2.2 Las metodologías y herramientas de programación de Producción en la Industria de Tejidos técnicos 22
1.1.2.3 La competitividad de la industria de tejidos técnicos en Colombia 23
1.2 El problema de programación de la producción en un flow shop híbrido flexible 23
1.2.1 Problema de Programación de la producción 23
1.2.1.1 *Flow shop* 24
1.2.1.2 *Flow shop* Híbrido 24
1.2.1.3 *Flow shop* Híbrido Flexible 24
1.2.2 Condiciones realistas en programación de producción 24
1.2.2.1 Máquinas Paralelas no relacionadas 24
1.2.2.2 Tiempo de montaje dependiente de la secuencia 25
1.2.2.3 Lotes de transferencia 25
1.2.2.4 Maleabilidad 25
1.2.2.5 Entrada Dinámica 26
1.2.2.6 Restricción de elegibilidad 26
1.2.2.7 Más de dos etapas 26
1.2.2.8 Función objetivo considerando fecha de entrega o costos 27
1.2.2.9 Datos basados en entornos reales 27
1.2.3 Las técnicas inteligentes 27
1.2.3.1 Metaheurísticas 27
1.2.3.1.1 Algoritmos Genéticos 28
1.2.3.1.2 Colonia de Hormigas 28
1.2.3.1.3 Recocido Simulado 28
1.2.3.1.4 Búsqueda Tabú 29
1.2.3.1.5 Agentes Inteligentes 29
1.2.3.1.6 Otros 29
1.3 Estado del arte 29
1.3.1 Estado del arte de las técnicas de programación de producción en entornos relacionados con el de producción de tejidos técnicos 30
1.3.2 Estado del Arte de aplicación de condiciones realistas en problemas de programación de producción afines a la industria de tejidos técnicos 34
1.3.3 Estado del arte de la programación de producción en entornos *flow shop* híbrido flexible 37
1.4 Conclusiones del capítulo 43

2. Modelo matemático de la propuesta de solución 45
2.1 Descripción de la metodología 45
2.1.1 Definición de conjuntos e índices 46
2.1.2 Definición de Variables 47
2.1.3 Definición de Parámetros 47
2.1.4 Modelo matemático completo 48
2.2 Conclusiones del Capítulo 50

3. Algoritmos propuestos para la solución del modelo 52
3.1 Algoritmo genético básico 53
3.1.1 Diseño del cromosoma 53
3.1.2 Población inicial 53

3.1.3 Asignación en etapas con máquinas paralelas 54
3.1.4 Cálculo de la función objetivo 54
3.1.5 Selección de Padres: 54
3.1.6 Cruzamiento: 55
3.1.7 Mutación 55
3.1.8 Actualización de la población 55
3.1.9 Criterio de parada 56
3.2 Propuestas de modificaciones al algoritmo 56
3.2.1 Asignación de máquinas en las etapas con paralelismo por Índice de Flexibilidad 56
3.2.2 Población inicial basada en reglas de prioridad 57
3.2.3 Selección de Padres determinística 58
3.2.4 Cruzamiento con operador que conserva fragmentos de secuencias en iguales posiciones. 58
3.2.5 Probabilidad Variable de mutación 59
3.3 Conclusiones del capítulo 60

4. Resultados 61
4.1 Diseño del conjunto de datos de prueba 61
4.2 Primera fase: Prueba de las propuestas de modificación 64
4.2.1 Diseño experimental primera fase 64
4.2.2 Parámetros de las variantes del algoritmo en la primera fase 65
4.2.3 Resultados computacionales primera fase 66
4.2.4 Discusión de resultados de la primera etapa 69
4.3 Segunda fase: Prueba de las propuestas definitivas 70
4.3.1 Diseño de las variantes del algoritmo para las propuestas definitivas 70
4.3.2 Parámetros de las variantes del algoritmo de las propuestas definitivas 71
4.3.3 Resultados computacionales de las propuestas definitivas 72
4.3.4 Discusión de los resultados 82
4.4 Conclusiones del capítulo 86

5. Conclusiones Generales 87

6. Recomendaciones 89

7. Líneas de trabajo futuro 91

Lista de figuras

Pág.

Figura 0-1 Esquema de la introducción 4
Figura 1-1 Esquema del capítulo 17
Figura 1-2: Proceso de Fabricación de Tejidos Técnicos 18
Figura 1-3 Proporción de trabajos que mencionan su aplicación a la industria textil 31
Figura 1-4: Tipos de problemas estudiados en los artículos sobre secuenciación revisados para el estado del arte. 32
Figura 1-5: Algoritmos de solución aplicados a problemas de secuenciación 33
Figura 1-6: Porcentaje de aplicación de funciones objetivo en trabajos de secuenciación. 34
Figura 1-7: Condiciones realistas consideradas en los trabajos de programación de producción 35
Figura 1-8: Distribución porcentual del número de condiciones realistas consideradas simultáneamente en los artículos científicos sobre programación de producción. 37
Figura 1-9: Algoritmos propuestos para la secuenciación en *Flow Shop* Híbrido flexible 40
Figura 1-10: Tipos de funciones objetivo en problemas de secuenciación *Flow Shop* híbrido flexible 41
Figura 1-11: Porcentaje de trabajos que modelan cada una de las condiciones de entorno real en configuración *flow shop* híbrido flexible vs otras configuraciones. 42
Figura 2-1: Esquema del capítulo 45
Figura 3-1: Esquema del capítulo 52
Figura 3-2: Diseño del cromosoma. Ejemplo con 24 trabajos. A cada posición corresponde un trabajo. 53
Figura 3-3: Esquema de funcionamiento del operador de cruzamiento K-P. Ejemplo para 16 trabajos con $\mathrm{K} = 3$ puntos de cruce. 55
Figura 3-4: Esquema de cruzamiento SJKOX. Ejemplo con 16 trabajos y $\mathrm{k} = 3$ puntos de cruce. 59
Figura 4-1: Esquema del capítulo 61
Figura 4-2: Rangos de RDI por caso en cada variante propuesta. 77
Figura 4-3: Rangos de RDI por planta en cada variante propuesta. 78
Figura 4-4: Resultados de RDI por variante promediando todos los resultados de todas las instancias 79

Figura 4-5: Gráfico de regresión que ilustra la incidencia de la población inicial (reglas de prioridad) usando asignación por índice de flexibilidad en el RDI del resultado final por la variante ABDE. 80
Figura 4-6: Gráfico de regresión que ilustra la incidencia de la población inicial (reglas de prioridad) usando asignación por máximo tiempo disponible en el RDI del resultado final por la variante BDE. 81
Figura 4-7: Tiempos computacionales (en minutos) para llegar a la solución vs número de trabajos a secuenciar en el problema a resolver. 82
Figura 4-8: Gráfico Gantt resultado de la secuenciación para el caso 5 (30 trabajos) en la planta 4 (5-2-20-1). Mejor resultado con variante ABDE. 83

Lista de tablas

Pág.

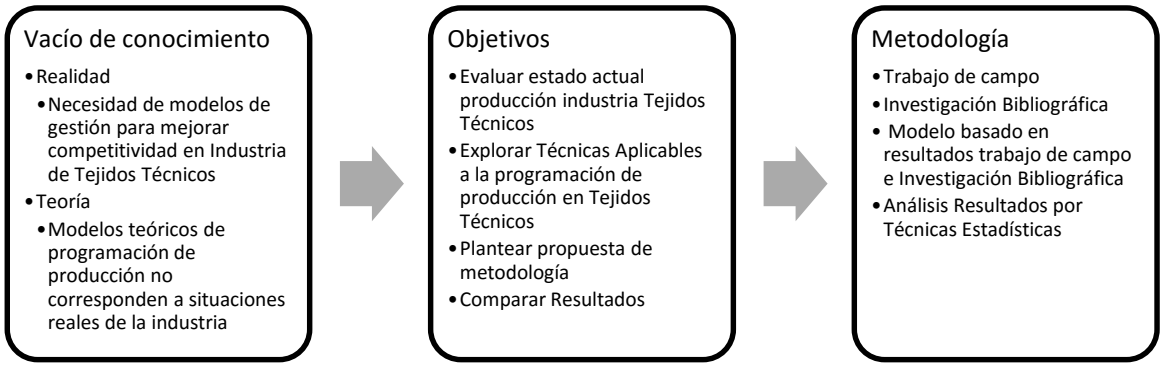
Tabla 1-1: Importancia Variables dependientes según sondeo a expertos. 21
Tabla 1-2: Cantidades promedio y participación porcentual en el diseño de los casos de prueba en trabajos sobre configuración *flow shop* híbrido flexible 43
Tabla 4-1: Configuración de las plantas para la prueba de las variantes del algoritmo 62
Tabla 4-2: Diseño de los casos de prueba 63
Tabla 4-3: Tiempos de montaje en horas según etapa y características compartidas entre producto previo y producto a montar 63
Tabla 4-4: Resumen diseño del conjunto de datos de prueba 63
Tabla 4-5: Configuración de las variantes del algoritmo genético para las pruebas de la primera fase. Factores = propuestas de modificación al genético básico. 65
Tabla 4-6: Parámetros de operación de las variantes del algoritmo genético para las pruebas de la primera fase. 66
Tabla 4-7: Signos para cada suma de resultados de combinación de tratamientos en el cálculo de los contrastes para determinar los efectos de cada factor y sus combinaciones. Adaptada para $k = 5$ de (Montgomery, 2004). 67
Tabla 4-8: Resumen análisis de varianza. Efectos significativos de los factores en cada una de las instancias de prueba. F= Favorable, D=Desfavorable 68
Tabla 4-9: Configuración de las variantes propuestas de algoritmos genéticos 71
Tabla 4-10: Parametrización variantes propuestas del algoritmo (ABDE, BDE y (1)) 71
Tabla 4-11: Comparativo Tardanza media, Variantes propuestas del algoritmo genético y mejores resultados por reglas de prioridad. Resaltado el mejor resultado para cada instancia de prueba 72
Tabla 4-12: Comparativo RPD, variantes propuestas del algoritmo y mejores resultados por reglas de prioridad. Resaltado el mejor resultado para cada instancia de prueba 73
Tabla 4-13: Comparativo RPI, Variantes propuestas del algoritmo genético. Resaltado el mejor resultado para cada instancia de prueba. 74
Tabla 4-14: Comparación resultados propuestas de variantes del algoritmo genético y mejores resultados de reglas de prioridad según RDI. Resaltado el mejor promedio para cada instancia. 76
Tabla 4-15: Análisis de varianza RDI Factores: Instancias de prueba y variantes del algoritmo. Nivel de confianza = $1 - \alpha = 0{,}95$ 79
Tabla 7-1: Análisis de Literatura sobre el tema de secuenciación en entornos afines a la producción de tejidos técnicos 105

Tabla 7-2. Condiciones de entorno real consideradas en artículos sobre secuenciación en modelos afines al de la industria de tejidos técnicos. En tres páginas 112
Tabla 7-3: Publicaciones científicas de solución al problema de secuenciación en *Flow Shop* Híbrido Flexible 115
Tabla 7-4: Lista de máquinas para casos de prueba, incluye código de la máquina, etapa a la que corresponde, tipo de máquina, tasa de producción en kilogramos por hora, utilización en porcentaje, referencia en curso al momento de programar y fecha prevista en la que estará disponible para un nuevo trabajo. 118
Tabla 7-5: Lista de productos usada en los casos de prueba, incluye código del producto, máquinas elegibles para procesarlo (H=etapa 1, U=etapa 2; T= Etapa 3, A= Etapa 4) y Unidad comercial en Kilogramos 119
Tabla 7-6: Eficiencia en porcentaje según elegibilidad de máquinas. Incluye referencia y eficiencia de cada máquina cuando procesa ese producto. Casillas vacías significan que la máquina no es elegible para ese producto. Casillas con valor cero significan que ese producto no pasa por esa etapa. 121
Tabla 7-7: Lista de pedidos incluidos en casos de prueba, con código de pedido, nombre del cliente, fecha de toma del pedido, plazo máximo de entrega, referencia y casos en los que se incluye el pedido. 123
Tabla 7-8: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 1 (5-2-20) 126
Tabla 7-9: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 2 (5-20-1) 127
Tabla 7-10: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 3 (2-20-1) 128
Tabla 7-11: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1) 129
Tabla 7-12: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 1 (5-2-20) 130
Tabla 7-13: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 2 (5-20-1) 131
Tabla 7-14: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 3 (2-20-1) 132
Tabla 7-15: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1) 133
Tabla 7-16: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 1 (5-2-20) 134
Tabla 7-17: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 2 (5-20-1) 135
Tabla 7-18: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 3 (2-20-1) 136
Tabla 7-19: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1) 137

Tabla 7-20: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 1 (5-2-20) 138
Tabla 7-21: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 2 (5-20-1) 139
Tabla 7-22: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 3 (2-20-1) 140
Tabla 7-23: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1) 141
Tabla 7-24: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (30 trabajos) en planta 1 (5-2-20) 142
Tabla 7-25: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (30 trabajos) en planta 2 (5-20-1) 143
Tabla 7-26: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (40 trabajos) en planta 3 (2-20-1) 144
Tabla 7-27: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (30 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1) 145
Tabla 7-28: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 1 (5-2-20) 146
Tabla 7-29: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 2 (5-20-1) 147
Tabla 7-30: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 3 (2-20-1) 148
Tabla 7-31: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1) 149
Tabla 7-32: Programación detallada caso 5 (30 trabajos) en planta 1 (5-2-20-1) obtenida con el algoritmo ABDE. 150

0.Introducción

Figura 0-1 Esquema de la introducción



Se consideran como tejidos técnicos, los productos textiles que no pueden inscribirse dentro de los usos habituales para vestuario, hogar o decoración (López Rodriguez, 2011). En Colombia, este subsector tiene alto potencial exportador, invierte en investigación y desarrollo de nuevos productos, y tiene un número creciente de clientes en sectores especializados. Se compone de seis empresas que fabrican productos con destino a diferentes sectores industriales. Las aplicaciones de los textiles diferentes al vestido son cada vez más frecuentes y dinámicas. Se destacan las relacionadas con la industria de llantas para automóviles, bandas transportadoras, telas para blindaje y protección balística, y aplicaciones geotextiles.

Las empresas colombianas productoras de tejidos técnicos son de tamaño mediano, con integración vertical, predominando el sistema de tejido plano. La industria de tejidos técnicos hace parte del sector textil y su cadena de valor (fibras-textiles-confecciones), conformando uno de los sectores más importantes en la economía colombiana. Al sector textil se le reconoce como líder de las exportaciones no tradicionales. La cadena de valor

de la que hace parte la industria textil tiene un alto impacto en la generación de empleo. (Escorcia & Duque, 2004).

Entre las mayores debilidades del sector textil, de acuerdo a diferentes estudios, figuran los costos y los Tiempos de Respuesta. (Arango Serna, Pérez O., & Álvarez Uribe, 2009; Cidetexco, 2003; DNP, 2007; McKinsey & Company, 2009; USITC, 2004). En cuanto a la administración de la producción existen dificultades como: bajo nivel de innovación en productos y procesos, falta de sistemas integrados de información, y producción sin tener en cuenta parámetros de eficiencia o ineficiencia (Cidetexco, 2003; Van der Bruggen, 1998).

Algunas empresas del sector han hecho altas inversiones en los últimos años en Sistemas de Información e implementación de herramientas ERP (McKinsey & Company, 2009). Aunque estas herramientas pueden mejorar el desempeño de las empresas y la toma de decisiones (Escorcia & Duque, 2004), su papel primordial es la gestión de recursos a nivel táctico y el control de ejecución, más que la programación. Las estrategias de optimización de la programación no están consideradas en el estándar de este tipo de sistemas. (Harjunkoski, Nyström, & Horch, 2009). Por otra parte, los ERP comerciales presentan desventajas que desestimulan su generalización (Aguilar Sánchez & Sánchez Castelló, 2009). Además, las tecnologías de información para la planificación y control de producción, están aún poco implantadas en el sector. (Salinas Vivancos, 2004).

Un requerimiento clave para el desarrollo del sector es lograr un alto desempeño en la gestión de producción. Para acelerar su crecimiento, la industria textil colombiana debe distinguirse en oportunidad de entrega alcanzando altos niveles en *time-to-market* y cumplimiento, y desarrollando o adoptando tecnologías y procedimientos que aseguren flexibilidad y confiabilidad. Aumentar la velocidad, confiabilidad y costo-eficiencia de los procesos productivos es una de las habilidades principales a desarrollar (McKinsey & Company, 2009)

Una estrategia clave del plan de competitividad sectorial dentro de la agenda interna es “Maximizar la productividad y competitividad mediante la adopción de planes de innovación y desarrollo tecnológico”. (DNP, 2007). Dado que la programación de la producción es de vital importancia para mejorar la eficiencia y reducir los costos en los procesos productivos, determinando qué recursos y qué espacio temporal dedicar a cada tarea (Niccolò, 2011); es pertinente proponer una metodología de programación de la producción que permita mejorar los tiempos de entrega de las empresas colombianas productoras de tejidos técnicos.

El *flow shop* o taller de flujo híbrido flexible con máquinas paralelas (configuración productiva de la industria textil en general y en particular del subsector de tejidos técnicos), ha tenido creciente interés en los años recientes (Ribas, Leisten, & Framiñan, 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010), aunque los trabajos publicados rara vez provienen de aplicaciones al mundo real. Los esquemas de programación de la producción no han sido aplicados en la industria por razones como el desconocimiento

por parte del personal encargado de la planeación y programación de producción y la gran distancia entre los modelos teóricos y las condiciones reales de fabricación (Gómez Gasquet, 2010).

Las empresas fabricantes de tejidos técnicos, presentan particularidades en sus procesos (máquinas paralelas no relacionadas, tiempos de preparación dependientes de la secuencia, lotes de transferencia variables, maleabilidad, entrada dinámica, restricción de elegibilidad, etc.), que hacen necesario que, para su programación, se deban implementar soluciones a la medida de su propia problemática y que, muchas veces, soluciones estándar para otras industrias no sean aplicables. (Guinet, 1991; Karacapilidis & Pappis, 1996)

La mayoría de los desarrollos de algoritmos de secuenciación de tareas asume una serie de supuestos que no corresponden con las situaciones reales (Gómez Gasquet, 2010). Hay una distancia entre los modelos teóricos y la realidad de la producción (Linn & Zhang, 1999) y aunque se puede reconocer una tendencia a encontrar modelos más cercanos a la realidad en trabajos recientes, todavía son escasos los trabajos que consideran la mayoría de las particularidades de cada industria, y más escasos aun los que están basados en experiencias sobre plantas de producción del mundo real (Ribas, Leisten, & Framiñan, 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010). Se sabe que este tipo de problemas son NP-Completos, lo que implica su tratamiento por técnicas inteligentes (Gómez Gasquet, 2010).

Las técnicas inteligentes son algoritmos matemáticos basados en conocimiento científico que permiten tratar problemas complejos de optimización cuya solución por métodos exactos es costosa en tiempo computacional o, en definitiva, imposible de obtener con los recursos disponibles en un tiempo razonable. En los últimos años y gracias al desarrollo y popularización de los equipos de cómputo, este tipo de técnicas han llegado a un alto nivel de eficiencia y se están aplicando a diversos problemas de ingeniería (Gallego, Escobar, & Romero, 2006).

En una investigación previa para la formulación de este trabajo, se hizo una revisión de 43 artículos científicos de los años 2010 al 2012, cuya temática estaba relacionada con *flow shop* híbridos y/o máquinas paralelas, analizando el modelado de situaciones de los entornos reales de producción. Solo el 12% de los trabajos supuso máquinas paralelas no relacionadas; el 49% de los trabajos revisados consideró los tiempos de montaje dependientes de la secuencia; sólo un 7% consideraron la variabilidad del lote de transferencia y un 2% la posibilidad de entrada dinámica de trabajos a la programación. Un 7% modeló la maleabilidad de los trabajos; el 53% tuvo en cuenta un modelo de más de 2 etapas; el 33% tuvo funciones objetivo relacionadas con la fecha de entrega (mínima tardanza/anticipación) y un 5%, funciones objetivo relativas a los costos. Sólo un 5% trabajó con datos tomados de entornos reales de producción.

Los trabajos de (Linn & Zhang, 1999; Ribas, Leisten, Framiñan, & Framin, 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010) hacen un recorrido similar sobre este tipo de problemas en un rango de tiempo más amplio (y anterior al considerado en la investigación previa),

llegando a conclusiones similares a las aquí presentadas. Esta muestra sobre los 3 años más recientes confirma las apreciaciones de los artículos mencionados acerca de la tendencia que se aprecia en esta temática.

Todos los trabajos revisados (así como los reseñados (Linn & Zhang, 1999; Ribas, Leisten, Framiñan, et al., 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010)), presentan deficiencias en la consideración de las dificultades propias de los entornos productivos reales. Si definimos las siguientes nueve condiciones de entorno realista: Máquinas paralelas no idénticas o no relacionadas, lotes de transferencia variables, tiempos de montaje dependientes de la secuencia, maleabilidad, entrada dinámica, más de 2 etapas, función objetivo relacionada con fecha de entrega o costo, elegibilidad y, datos de entornos reales; ningún trabajo cumple a la vez con más de 4 condiciones; sólo 2 trabajos cumplen simultáneamente con 4 condiciones; 9 artículos cumplen con 3; 15 documentos cumplen con 2; 12 papers con 1 y 5 no cumplen ninguna. De allí que se la necesidad de modelar entornos el *flow shop* híbrido flexible de la forma más completa posible; teniendo en cuenta la mayoría de las condiciones reales de la producción. En particular, en este estudio, las que caracterizan a la producción de tejidos técnicos. (En la sección 1.3.2 (página 34) se presenta el análisis actualizado hasta 2015 de esa investigación previa).

Se establece entonces que: i) La industria colombiana, en especial el sector textil al que pertenece la industria de tejidos técnicos, requiere modelos de gestión que aporten a mejorar su competitividad. Y que: ii) Los trabajos sobre programación de producción adolecen de desconexión con los entornos productivos reales y requieren un modelado más completo y aterrizado a la realidad de la industria. Allí se encuentra el vacío de conocimiento: La industria requiere modelos que mejoren su competitividad y los modelos de programación desarrollados simplifican demasiado el problema, ignorando condiciones reales de la producción, haciéndolos inaplicables en la realidad.

0.1 Problema de investigación

A partir del vacío en el desarrollo de soluciones de programación en entornos *Flow shop* Híbrido flexible considerando condiciones de entorno real, de la necesidad de la industria de tejidos técnicos de ser más ágil en la atención a las solicitudes del mercado y del desarrollo de las técnicas inteligentes como opción para diversas problemáticas de la industria; se ha planteado el problema de investigación:

> ¿Cómo se puede mejorar la programación de producción, considerando los tiempos de entrega, en la industria colombiana de tejidos técnicos por medio de una metodología de programación de la producción que considere las características de sus procesos y aplique técnicas inteligentes?

Con las siguientes preguntas que contribuyen a responder para resolver el problema planteado:

¿Cuál es el estado actual de la función de producción en las empresas colombianas fabricantes de tejidos técnicos?

¿Qué técnicas se han propuesto a nivel internacional para la programación de la producción que puedan ser aplicadas a la industria textil?

¿Cómo crear una metodología, basada en técnicas inteligentes, para la programación de la producción de la industria textil que considere la mayoría de las situaciones que inciden en ese proceso y que mejore los tiempos de entrega en las empresas colombianas fabricantes de tejidos técnicos?

¿Cómo verificar que la metodología propuesta como resultado de esta investigación sí contribuye a mejorar los tiempos de entrega de las empresas colombianas fabricantes de tejidos técnicos?

0.2 Objetivos

0.2.1 Objetivo General

Proponer una metodología de programación de la producción, aplicada a la industria textil, mediante un análisis de la situación actual de la función de producción en las empresas productoras de tejidos técnicos, un inventario de las técnicas aplicables, y el desarrollo con base en la caracterización y el inventario, de un modelo metodológico de programación de la producción, tanto predictiva como reactiva, basada en técnicas inteligentes, para mejorar los tiempos de entrega de las industrias colombianas fabricantes de tejidos técnicos.

0.2.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar el estado actual de la función de producción en las empresas colombianas fabricantes de tejidos técnicos, para definir de la forma más completa posible las situaciones a considerar en la programación de producción en este tipo de industrias.

2. Explorar, mediante una investigación bibliográfica, las diferentes técnicas propuestas a nivel internacional para la programación de la producción aplicables al modelo de flujo de la industria textil.

3. Plantear una metodología para la programación de la producción en las industrias del sector textil que considere la mayor variedad posible de condiciones del mundo real, basado en el estado actual y proponer alternativas de solución basadas en el inventario de técnicas propuestas a nivel internacional.

4. Comparar, mediante técnicas estadísticas, los resultados de la aplicación de la metodología producto de esta investigación, frente a otras alternativas de

programación de la producción de la industria textil, buscando determinar la efectividad de la solución propuesta, en cuanto a su capacidad de reducir la tardanza, y por lo tanto, de mejorar los tiempos de entrega.

0.3 Hipótesis

Por medio de una metodología de programación de la producción para las empresas textiles como el subsector de tejidos técnicos, adecuada específicamente a las características de sus procesos, que considere todo el proceso productivo y que aplique técnicas inteligentes; es posible mejorar los tiempos de entrega en la industria colombiana de tejidos técnicos, contribuyendo, así mismo a la reducción de los costos de producción, el tiempo de respuesta y los inventarios de producto en proceso.

0.4 Alcance y Limitaciones

El alcance de ésta investigación está planteado sobre el subsector de Tejidos Técnicos en Colombia, definido como el conjunto de empresas textiles que fabrica telas de uso industrial, con mayor valor agregado funcional que estético, que aplica el sistema de tejido plano y tiene integración vertical de al menos dos etapas. Sin embargo, al estar modelando la configuración *flow shop* híbrido flexible con condiciones de entorno realista, se aporta al modelamiento y solución de los problemas de programación de producción de un amplio número de empresas.

Aunque se tuvieron limitaciones para recibir información por parte de algunas de las empresas, se logró obtener respuesta de la mitad de las compañías que conforman el subsector y se pudo establecer el estado de las condiciones en las que se programa la producción en ese grupo de empresas.

No obstante, aquí no se propone solamente una solución para el problema de programar producción en el subsector de tejido técnico. La importancia de esta investigación trasciende más allá, al modelar en conjunto más condiciones de los entornos reales de producción que el trabajo más completo que se encontró en la revisión bibliográfica en cuanto a modelado realista para el *flow shop* híbrido flexible; y al generar propuestas de solución aplicables a los entornos reales y con desempeños competitivos para la actividad de programación de la producción en la industria,

Se desarrolló un conjunto de datos basado en situaciones reales de este tipo de industria y se compararon los resultados con los obtenidos con técnicas y heurísticas probadas por otros investigadores. Como el modelado que aquí se presenta es mucho más completo y complejo que los antecedentes teóricos, no se hicieron pruebas con conjuntos de datos previamente tratados por otros investigadores, que a la luz de lo que se trabajó en esta investigación resultan al menos incompletos y adolecen de falta de sustento real. Prioritariamente, se ha trabajado con información basada en la realidad de la industria,

incluyendo detalles propios de la producción real que hasta ahora no se habían modelado conjuntamente para este tipo de trabajos.

0.5 Metodología

El desarrollo metodológico de la tesis incluye una etapa de recolección de información primaria (trabajo de campo), visitando el entorno de producción, y entrevistando a expertos relacionados con la industria y a responsables de la programación de producción en las diferentes empresas. A esa información primaria se le suma la información secundaria publicada en revistas, libros y memorias de eventos acerca de propuestas para solucionar problemas relacionados con la programación de la producción en ambientes similares al textil (*flow shop* híbrido flexible).

A partir del trabajo de campo y la exploración bibliográfica, se construyen las diferentes variantes que confluyen en las propuestas de solución. Con base en datos reales, se elaboran casos de prueba para las variantes del algoritmo. Se implementan las soluciones en sistemas informáticos y se prueban, recopilando y analizando los resultados obtenidos. Se modela el proceso completo y se incorporan diferentes particularidades propias de los entornos reales, probando alternativas de secuenciación y asignación de trabajos en una propuesta de reducción de tardanza media mediante algoritmos genéticos incluyendo 9 particularidades deseables en un entorno realista. Esta solución es la metodología de programación propuesta, que modela un algoritmo genético con opciones de operadores de cruce y mutación, modelado de población inicial, selección de padres y tasa de mutación orientadas al tipo de problema que se está resolviendo, aplicable a la programación de la producción en el entorno estudiado.

0.6 Productos obtenidos

El aporte concreto de la investigación desarrollada, ha generado los siguientes productos:

0.6.1 Generación de nuevo conocimiento

- Una evaluación del estado actual de la programación de la producción en las empresas colombianas fabricantes de tejidos técnicos, que se presenta en el Numeral 1.1.2 (Ver página 20)
- Un inventario general de las técnicas y teorías aplicadas en la actualidad en los procesos de programación de la producción afines al de la industria textil a nivel mundial, presentado en el Numeral 1.3 (página 29)
- El Modelado matemático, los algoritmos de solución y las pautas para la implementación de modelos y métodos apropiados para la programación de la producción en las industrias fabricantes de tejidos técnicos, con base en técnicas inteligentes. Resultados previos de la investigación se publicaron en (Arango,

Giraldo, & Castrillón, 2013; Arango-marín, Giraldo-garcía, & Castrillón-gómez, 2014; González Palacio, Castrillón-gómez, & Arango-marín, 2013; López Vargas, Giraldo García, & Arango Marín, 2015) y la propuesta final presentada en el Capítulo 2 (página 45).

- La propuesta metodológica de programación de la producción, para mejorar los tiempos de entrega en las empresas colombianas fabricantes de tejidos técnicos que se conforma integralmente en este documento.

0.6.2 Productos de Software

Aplicativo CAL. Programación de máquinas paralelas no relacionadas con tiempos de montaje dependientes de la secuencia, maleabilidad y entrada dinámica con algoritmos genéticos. (Registro Libro 13 Tomo 47 Partida 296 del 2 de Junio del 2015 Ministerio del Interior – Dirección Nacional de Derechos de Autor)

Aplicativo PESO. Diseño de productos textiles con algoritmos genéticos (Registro Libro 13 Tomo 47 Partida 291 del 2 de Junio del 2015 Ministerio del Interior – Dirección Nacional de Derechos de Autor)

Aplicativo MIX. Mezcla óptima de productos para una empresa textil (Registro Libro 13 Tomo 47 Partida 300 del 2 de Junio del 2015 Ministerio del Interior – Dirección Nacional de Derechos de Autor)

Aplicativo TOC. Heurística de mezcla óptima de teoría de restricciones aplicada a la programación de producción en máquinas paralelas. (Por registrar).

Aplicativo HFFS-EA. Programación de *flow shop* híbrido flexible en múltiples etapas minimizando tardanza media con máquinas paralelas no relacionadas en todas las etapas, tiempos de montaje dependientes de la secuencia, maleabilidad, entrada dinámica, lotes de transferencia variables, (En versión Beta).

0.6.3 Apropiación Social del Conocimiento

0.6.3.1 Ponencias presentadas en eventos académicos en el área del proyecto:

ARANGO M., Jaime Antero. Diseño Óptimo de Productos usando Algoritmos Genéticos. En: ALIO/INFORMS International Meeting 2010. Universidad de Buenos Aires. 2010.

ARANGO Jaime A., CASTRILLÓN Omar D., GIRALDO G. Jaime A. The optimal TOC textile product mix. En: II Congreso Peruano de Investigación de Operaciones y Sistemas COPIOS 2010. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa (Perú), 2010.

ARANGO Jaime A., CASTRILLÓN Omar D., GIRALDO G. Jaime A. Optimizing the development of textile products. En: II Congreso Peruano de Investigación de Operaciones y Sistemas COPIOS 2010. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa (Perú), 2010.

ARANGO Jaime A., CASTRILLÓN Omar D., GIRALDO G. Jaime A. Finding Optimal the textile product mix with linear programming and evolutionary algorithms. En: II Congreso Peruano de Investigación de Operaciones y Sistemas COPIOS 2010. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa (Perú), 2010.

ARANGO Jaime A., CASTRILLÓN Omar D., GIRALDO G. Jaime A. Optimal scheduling for a set of looms using evolutionary algorithms. En: II Congreso Peruano de Investigación de Operaciones y Sistemas COPIOS 2010. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa (Perú), 2010.

ARANGO Jaime A., CASTRILLÓN Omar D., GIRALDO G. Jaime A. Clasification of textile products using multivariate discriminant analysis. En: International Conference on Applied Mathematics and Informatics. San Andrés Islas (Colombia), 2010.

ARANGO Jaime A., CASTRILLÓN Omar D., GIRALDO G. Jaime A. Optimal development of textile products using Genetic Algorithms. En: 15th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics WMSCI 2011. Orlando – Florida (U. S. A.), 2011.

ARANGO Jaime A., GIRALDO G. Jaime A. Mezcla Óptima de Productos para una Empresa Textil desde el punto de vista de la Teoría de Restricciones. En: III Congreso Internacional de Ingeniería Industrial. Universidad Libre. Bogotá (Colombia). 2011.

GONZALEZ Ángela, CASTRILLÓN Omar D, ARANGO Jaime A. Programación de un *flow shop* híbrido con tiempos de montaje dependientes de la secuencia y máquinas paralelas no relacionadas usando métodos aleatorios. En: SEIO 2013 XXXIV Congreso nacional de estadística e investigación operativa. Universitat Jaume I, Castellón (España). Septiembre 2013.

ARANGO Jaime A, GIRALDO, Jaime A., CASTRILLÓN, Omar D.Reducing Tardiness in Hybrid Flexible *Flow shop* Environment: Application to Technical Textile Industry. En: ICAMI 2013: International Conference on Applied Mathematics and Informatics. San Andrés Islas (Colombia), Noviembre 2013.

ARANGO Jaime A, GIRALDO, Jaime A., CASTRILLÓN, Omar D. Programación detallada de producción textil en un entorno realista usando algoritmo genético modificado. En: Décima Cuarta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática: CISCI 2015. Orlando – Florida (Estados Unidos de América), Julio 2015.

ARANGO Jaime A, GIRALDO, Jaime A., CASTRILLÓN, Omar D. Algoritmos Genéticos para la reducción de tardanza en un *flow shop* híbrido flexible en condiciones de entorno real. Aprobado para ser presentado en: 12° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos: CAIP´2015. Cartagena de Indias (Colombia), Septiembre 2015.

0.6.3.2 Artículos para revistas indexadas

ARANGO Jaime A, GIRALDO, Jaime A., CASTRILLÓN, Omar D. Programación de Máquinas Paralelas no Relacionadas con Tiempos de Montaje Dependientes de la Secuencia y Entrada Dinámica usando Algoritmos Genéticos. En: Revista Información Tecnológica 24(3) páginas 73-84. La Serena (Chile). 2013 (*Categoría A1*)

ARANGO, Jaime A, GIRALDO, Jaime A., CASTRILLÓN, Omar D. Applying TOC Heuristics to Job Scheduling in a Hybrid Flexible *Flow shop*. Dyna. Vol 81. No. 186. Agosto de 2014. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.(*Categoría A1*)

LÓPEZ, Juan Camilo; GIRALDO, Jaime Alberto, ARANGO, Jaime Antero. Reducción del *makespan* en la programación de producción de un *Flow shop* Híbrido Flexible (HFS). Información Tecnológica, 26(3).Mayo-Junio 2015. CIT. La Serena (Chile). (*Categoría A1*)

LÓPEZ, Juan Camilo; ARANGO, Jaime Antero. Algoritmo genético para reducir el *makespan* en un *flow shop* híbrido flexible con máquinas paralelas no relacionadas y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. Aprobado para ser publicado en: Revista Entramado. Universidad Libre. Cali (Colombia). (*Categoría B*)

ARANGO, Jaime A; GIRALDO, Jaime A.; CASTRILLÓN, Omar D. Modified Genetic Algorithm to minimize tardiness in a hybrid flexible *flow shop* environment. En evaluación: Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (*Categoría A2*)

0.6.3.3 Distinciones

Mejor artículo de sesión: Décima Cuarta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática: CISCI 2015. Sesión: Sistemas, Tecnologías, Aplicaciones de Información e Info-cibernética. . Orlando – Florida (Estados Unidos de América), Julio 15 2015.

0.6.3.4 Trabajos de Grado de pregrado

MORALES PIMIENTO, Mónica Marcela. Conclusiones de la revisión bibliográfica sobre técnicas matemáticas aplicadas a problemas de secuenciación. Trabajo de Grado. Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. Junio 2012c.

CARDONA CUNDAR, Deisy Yesenia. Formato para la evaluación y determinación de variables a optimizar en la programación de producción de las empresas textiles colombianas productoras de tejidos técnicos. Trabajo de Grado. Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. Junio 2012.

0.6.3.5 Tesis de Maestría

GONZÁLEZ PALACIO, Ángela. Diseño de una metodología de programación de producción para la reducción de costos en un *flow shop* híbrido flexible mediante el uso de algoritmos genéticos. Aplicación a la industria textil. Tesis de grado. Maestría en Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. Julio 2013.

LÓPEZ VARGAS, Juan Camilo. Metodología de programación de producción en un *flow shop* híbrido flexible con el uso de algoritmos genéticos para reducir el *makespan* : aplicación en la industria textil. Tesis de Grado. Maestría en Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. Abril 2013.

0.6.3.6 Tesis de doctorado en Ingeniería (Línea de Investigación en Industria y Organizaciones).

ARANGO MARÍN, Jaime Antero. *Mejora de tiempos de entrega en un flow shop híbrido flexible usando técnicas inteligentes. Aplicación en la industria de tejidos técnicos*. Tesis de Grado. Doctorado en Ingeniería – Industria y Organizaciones. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. 2015 (*Es el presente documento*)

0.7 Esquema general de la tesis:

En el capítulo 1 (página 17) se presenta el marco teórico, el resultado de la evaluación producto del trabajo de campo que desarrolla el primer objetivo específico y el estado del arte que desarrolla el segundo objetivo específico.

En el capítulo 2 (página 45) se presenta el modelo matemático basado en el trabajo de campo y el estado del arte, que hace parte del cumplimiento del tercer objetivo específico.

En el capítulo 3 (página 52) se presentan las propuestas de solución al modelo matemático completando el cumplimiento del tercer objetivo específico.

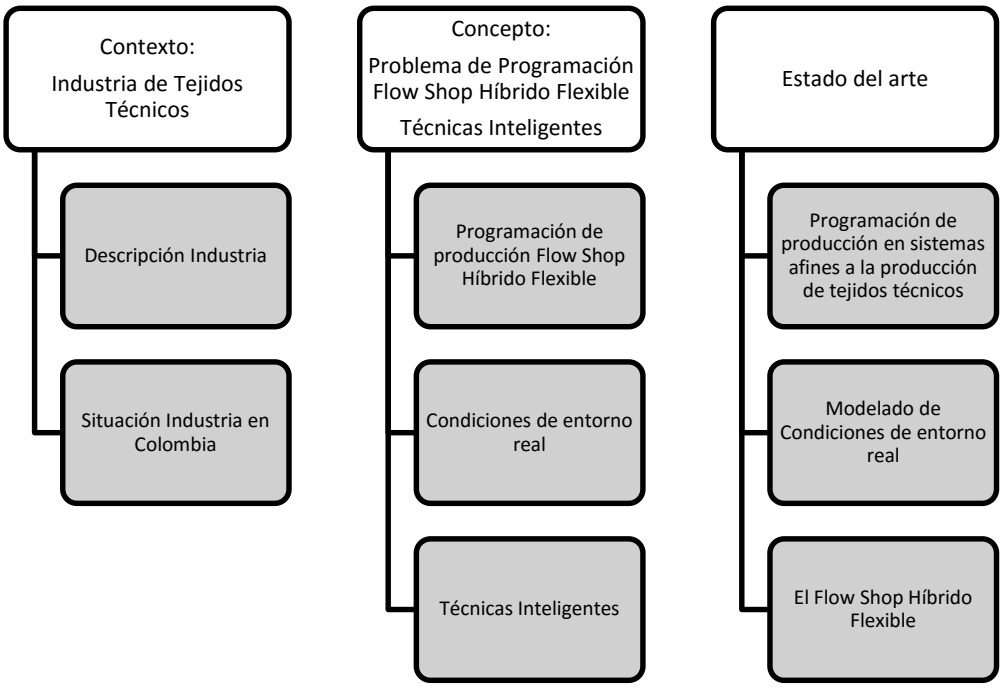
En el capítulo 4 (página 61) se detallan y analizan los resultados de la prueba de los algoritmos y se hace la discusión de los mismos contrastándolos con lo encontrado en el estado del arte, cumpliendo el cuarto objetivo específico.

El capítulo 5 (página 87) corresponde a las conclusiones, el capítulo 6 (página 89) a las recomendaciones y el capítulo 7 (página 91) a las líneas de trabajo futuro.

Posteriormente en los anexos están los documentos de respaldo del trabajo de campo, el estado del arte, la definición de los casos de prueba y los resultados detallados de las pruebas.

1. Antecedentes Contextuales y Teóricos

Figura 1-1 Esquema del capítulo



1.1 Industria de Tejidos Técnicos

Los Tejidos Técnicos son productos textiles dirigidos a un mercado especializado, conformado en su mayoría por grandes empresas fabricantes de productos como: llantas para automóvil, bandas transportadoras, productos geo-textiles para prevenir la erosión, chalecos antibalas y blindaje de vehículos, entre otros.

1.1.1 Descripción General de la Industria de Tejidos Técnicos

Aunque los tejidos técnicos comparten con el resto de productos textiles, muchas de sus características en cuanto a construcción, proceso y presentación, poseen a su vez un

conjunto de características distintivas que los diferencian e inciden en las decisiones relacionadas con su fabricación.

1.1.1.1 Materias Primas

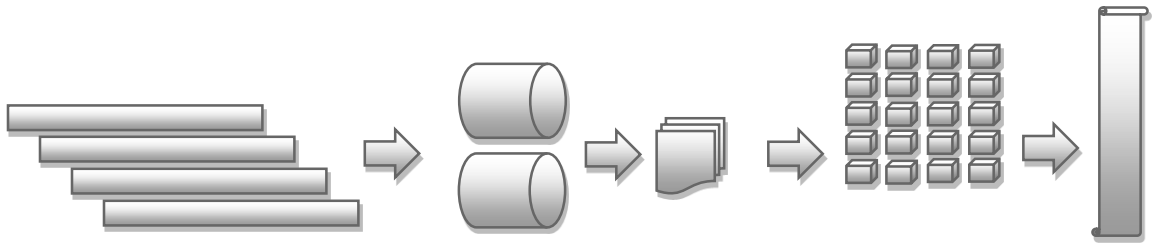
Los tejidos técnicos se elaboran en su mayoría de fibras sintéticas, en general, en forma de filamentos continuos. El Nylon, el Polyester y el Polipropileno son algunas de las composiciones más comunes. En productos de alta resistencia se utilizan poli-aramidas como el kevlar y el twaron. En Colombia, la mayor parte de las materias primas para los tejidos técnicos, en la actualidad, se importa del lejano oriente.

1.1.1.2 Productos

Los tejidos técnicos en general se elaboran a la medida de las necesidades de los clientes. Generalmente se solicitan características técnicas como resistencia al desgarre, peso o capacidad de adherencia a productos como el látex. En Colombia, se elaboran productos como chaffer (para llantas), bandas transportadoras, lonas de base para plastificación, geotextiles y telas para blindajes.

1.1.1.3 Proceso General

Figura 1-2: Proceso de Fabricación de Tejidos Técnicos



1.1.1.3.1 Preparación de Hilaza

La hilaza, generalmente, requiere procesos como retorcido o taslanizado, para tener las características requeridas para ser tejida. Estos procesos se realizan en maquinaria con múltiples entradas y salidas que pueden generar en ocasiones conos de hilo aptos para alimentar urdidoras y telares, aunque en ocasiones su salida son bobinas arrolladas de tal forma que requieren luego un proceso de devanado para poder ser utilizadas en los procesos subsiguientes.

1.1.1.3.2 Urdizaje

La Urdimbre es el conjunto de hilos que van a lo largo de la tela en el sistema de tejido plano. Los hilos se colocan paralelos sobre un tambor en el proceso de urdizaje, que generalmente se realiza por secciones parciales, lo que permite que se requieran menos conos de hilo de alimentación que los que se necesitarían si se hiciera en un solo paso.

1.1.1.3.3 Remetido

Los hilos de urdimbre, para alimentar los telares deben pasar por el peine (que controla la densidad del tejido en el sentido de la urdimbre), los lizos (que son las mallas que suben y bajan los hilos de urdimbre para que la trama quede insertada entre ellos), y las laminillas (sistema de detección de revientes y tensiones en el sentido de la urdimbre). Cuando el producto que va a montarse es similar al que reemplazará en el telar, este proceso no es necesario ya que es posible anudar la nueva urdimbre al final de la anterior y continuar con el montaje previo.

1.1.1.3.4 Tejeduría

Los telares son las máquinas que, al insertar la trama entre la urdimbre, fabrican el tejido. Hay diferentes tecnologías de inserción de trama como: lanzaderas, proyectiles, pinzas, chorro de aire y chorro de agua. En nuestro medio se utilizan mucho los telares de proyectil y de pinzas, de ancho sencillo (aproximadamente 2 m) o doble (aproximadamente 4 m), permitiendo varias salidas simultaneas. Aunque en el mundo se conocen velocidades de tejido de hasta 1200 tramas por minuto, en nuestro medio se utilizan tecnologías que están entre las 300 y 500 tramas por minuto. Cada telar puede tener características particulares que lo hacen diferente de los demás y le permiten poder procesar ciertos tipos de tejido. Entre esas características están el diámetro del enrollador y del desenrollador de tejido que le permiten trabajar con urdimbres de mayor tamaño, también están los dispositivos de refuerzo para trabajar con fibras como las poli-aramidas y los dispositivos de reducción de tramas para hacer tejidos más apretados o más holgados.

1.1.1.3.5 Acabados

Aunque en general los procesos de acabados comprenden una variedad de tratamientos como termofijado, lavado, secado, impermeabilizado, adición de látex, tintura, etc., es posible tener una sola línea de producción de acabados que permite realizar todos los procesos en un solo paso por la línea, conformada por un tren de máquinas en serie que conforman el conjunto de procesos a los que debe someterse el tejido para que quede listo para su uso final.

1.1.2 La Industria de Tejidos Técnicos en Colombia

La industria de Tejidos Técnicos en Colombia está compuesta por seis empresas, de tamaño mediano, tres de ellas están ubicadas en Bogotá, dos en Medellín, y una en Dosquebradas (Risaralda).

Aunque muchas empresas del sector textil colombiano tienen en su configuración comercial una división llamada de tejidos técnicos, en muchas de ellas esa área se dedica a la comercialización de tejidos con usos como tapicería o forros para asientos de vehículos y otros productos similares a los tejidos para fabricar prendas de vestir donde prima la estética sobre la funcionalidad. El presente trabajo se concentra en las empresas que producen tejidos de uso industrial definidos más por características técnicas referentes a sus propiedades físicas y químicas, que por su apariencia exterior. Se consideraron empresas que fabrican productos en el sistema de tejido plano con algún grado de integración vertical (más de una etapa del proceso de fabricación, incluido el tisaje o tejeduría), de tal forma que su configuración pueda catalogarse como un *flow shop* híbrido flexible.

Algunos de los productos que se elaboran en Colombia en la categoría de Tejidos Técnicos son: Lonas para carpas, bases para bandas transportadoras, geotextiles para prevenir la erosión, telas de alta resistencia para blindajes y protección anti-balas, telas para la fabricación de llantas, y telas para plastificación.

La mayor parte del mercado de esos productos está en el exterior, por lo que el subsector tiene importante participación en las exportaciones de textiles, en especial al mercado andino y latinoamericano.

Para la investigación presente, se contactaron las seis empresas textiles colombianas que fabrican tejidos técnicos en el sistema de tejido plano con proceso de tejeduría y algún grado de integración vertical. El contacto se hizo por teléfono, correo electrónico y en forma presencial. De dos de las empresas, pese a insistir por diferentes medios no se obtuvo respuesta, una de las empresas adujo que sus políticas institucionales le impedían revelar la información solicitada y las tres restantes suministraron la información que se resume a continuación. Por lo que se puede establecer que se tienen respuestas directas de los responsables de planear la producción en el 50% de las empresas que cumplen el perfil estudiado.

1.1.2.1 Las variables a optimizar en la programación de producción de la Industria de Tejidos Técnicos en Colombia

Un sondeo preliminar a un grupo cerrado de expertos vinculados a la industria de tejidos técnicos en Colombia, permitió establecer la importancia de diferentes variables dependientes en la producción de tejidos técnicos. Se les solicito a cada uno de los encuestados clasificar en las posiciones de la 1ª a la 4ª, donde la 1ª es la más importante para el entrevistado y la 4ª la menos importante; las cuatro variables que se encuentran con mayor frecuencia en los trabajos de programación de tareas en plantas industriales. Cada uno de los entrevistados ordenó las 4 variables propuestas de acuerdo a su criterio y experiencia en la industria de Tejidos técnicos.

Los resultados obtenidos de la clasificación se muestran en la Tabla 1-1, donde cada casilla muestra en porcentaje, la porción de expertos que estuvo de acuerdo en clasificar la variable de la fila respectiva en el lugar mostrado en el encabezado de la columna correspondiente.

Tabla 1-1: Importancia Variables dependientes según sondeo a expertos.

Variable	% Veces clasificada como				Posición media
	1ª	2ª	3ª	4ª	
Cumplimiento entregas	50%	25%	25%	0%	1,75
Costo	50%	0%	50%	0%	2,00
Tiempo de procesamiento	0%	75%	25%	0%	2,25
Inventario en Proceso	0%	0%	0%	100%	4,00

La Tabla 1-1 muestra una ligera preferencia de los encuestados por el cumplimiento de entregas como la variable más importante dentro de la industria de tejidos técnicos. Este sondeo permitió establecer que la variable a optimizar en esta investigación debería estar relacionada con los tiempos de entrega, en concordancia además con el título y los objetivos de la investigación.

Todos los expertos consultados coinciden en señalar el inventario en proceso como la variable menos importante. Al solicitar la justificación sobre la opinión expresada, los expertos indicaron que la industria de tejidos técnicos es un sector de alta competencia, donde cada día pueden aparecer nuevos usos y nuevas posibilidades, lo que hace que el tiempo de respuesta sea de vital importancia. Muchos de los clientes requieren que sus proveedores tengan la capacidad de reacción suficiente para responder en el menor tiempo posible a partir del pedido. En el mercado de bandas transportadoras, por ejemplo, pueden estarse necesitando para un proceso de extracción minera, que espera el producto para agilizar la explotación. De ahí que la lona de base sea solicitada para

entrega en un plazo de una o dos semanas para que el fabricante de la banda finalice el proceso oportunamente.

El costo es importante en la medida en que, en algunos productos no existe mayor diferenciación y los clientes pueden inclinarse por un proveedor que les ofrezca un buen servicio a un costo más favorable que la competencia.

Como las hilazas son importadas, principalmente del lejano oriente, las empresas acostumbran tener altos niveles de inventario para facilitar su respuesta y acortar los tiempos de entrega, de ahí que se entienda el hecho de que los inventarios en proceso sean la variable peor clasificada en el sondeo.

En la encuesta que cubrió el 50% de las empresas del subsector de tejidos técnicos (Ver el cuestionario en el Anexo A (página 93), la relación del cuestionario con el diseño de esta investigación en el Anexo B (página 96) y la tabulación de las respuestas en el Anexo C (página 101)), al ser preguntados sobre los criterios para programar la producción dentro del marco estratégico de la organización, los puntajes entre las diferentes opciones fueron también bastante parejos, aunque se encontró preferencia por el tiempo de procesamiento y el costo sobre el cumplimiento de entregas y el inventario en proceso.

La mayoría de las empresas interrogadas busca un equilibrio entre el aprovechamiento de los recursos productivos y el cumplimiento de sus compromisos con los clientes. En segundo lugar se considera el cumplimiento de la demanda con un mínimo de inventarios a pesar de que se cause inestabilidad en el uso de los recursos, en especial de la mano de obra.

1.1.2.2 Las metodologías y herramientas de programación de Producción en la Industria de Tejidos técnicos

De las posibles condiciones de entorno real que deben tenerse en cuenta en la programación de la producción en el *flow shop* híbrido flexible textil de los tejidos técnicos, a las que se les da mayor importancia son el paralelismo entre máquinas no relacionadas o no idénticas y el tamaño de lote variable entre etapas. La calificación, no obstante, es muy equilibrada, y de cerca se consideran también importantes los tiempos de montaje dependientes de la secuencia, la maleabilidad de los lotes y la entrada dinámica de pedidos.

Dos terceras partes de las empresas usan en la mayor parte de sus procesos de programación de producción la hoja de Cálculo Excel. La calificación que le dan a flexibilidad de sus herramientas es baja (2/5). Una de las empresas tiene un ERP propio

diseñado a la medida, hecho por el autor de este trabajo de investigación, que incluye una solución que hizo parte de la investigación previa. Esa empresa en particular no contestó esta parte de la encuesta. Dos tercios de las empresas tienen una herramienta propia para el control de tiempos de máquinas y la considera suficientemente flexible.

De las empresas que contestaron esta parte de la encuesta, se encontró satisfacción en los resultados en grado medio con el programa maestro y en alto grado con las herramientas de control (desarrolladas a la medida). En el resto de las etapas se ve insatisfacción con los resultados. En esas etapas predomina el uso de la hoja de cálculo Excel.

1.1.2.3 La competitividad de la industria de tejidos técnicos en Colombia

Las empresas se consideran altamente competitivas en especial en lo que tiene que ver con la calidad de los productos y el cumplimiento de las entregas. Hay una menor percepción de competitividad en cuando a costos y tiempos de respuesta.

Para la mayoría de las empresas las fechas de entrega se cumplen la mayoría de las veces (2/3) o incluso casi todas las veces (1/3).

1.2 El problema de programación de la producción en un flow shop híbrido flexible

La programación de la producción en las empresas productoras de tejido técnico se enmarca en el contexto de la problemática de programación de programación descrito a continuación, presentado en orden deductivo, empezando por la generalidad de la programación hasta terminar en el entorno específico aplicable a este subsector.

1.2.1 Problema de Programación de la producción

Dentro de las instancias de planificación, la programación de la producción es la etapa en la que se define la asignación de cada trabajo a cada máquina o conjunto de máquinas y la secuencia u orden en que serán procesados los diferentes trabajos pendientes. Estas decisiones pueden tener una fuerte incidencia en el aprovechamiento de la capacidad instalada y pueden influir en la capacidad de la empresa de cumplir con los compromisos con los clientes. (Gómez Gasquet, 2010)

Sin ser exhaustivos en la enumeración, a continuación se presentan los conceptos de programación de producción aplicables al problema planteado en este trabajo.

1.2.1.1 *Flow shop*

El *Flow shop* es un caso particular del *Job Shop* (programación de *n* trabajos en *m* máquinas) con la restricción de que todos los trabajos deben de pasar por todas las máquinas o etapas del proceso en el mismo orden. (Pinedo, 2009)

1.2.1.2 *Flow shop* Híbrido

El *Flow shop* Híbrido es un proceso de producción en línea en la que al menos una de las etapas está conformada por máquinas paralelas.

1.2.1.3 *Flow shop* Híbrido Flexible

Cuando en un *flow shop* híbrido, hay trabajos que pueden omitir al menos una de la etapas del proceso, la configuración se dice que es flexible, configurando por lo tanto un *Flow shop* híbrido flexible (Zandieh, Mozaffari, & Gholami, 2010)

1.2.2 Condiciones realistas en programación de producción

En los trabajos académicos sobre programación de producción se han implementado diferentes condiciones propias de los ambientes reales de producción. A continuación se definen las que se han encontrado modeladas en la literatura científica y se pueden encontrar en el proceso de fabricación de tejidos técnicos.

1.2.2.1 Máquinas Paralelas no relacionadas

Un conjunto de máquinas paralelas se entiende como una etapa de un proceso productivo en la que un trabajo debe pasar por una y sólo una de varias máquinas que están en la misma etapa. Las máquinas pueden ser idénticas (con las mismas tasas de producción y tiempos de alistamiento), no idénticas (o uniformes) o no relacionadas. El caso más general (y más común en el mundo real) es el de máquinas no relacionadas. (Gómez Gasquet, 2010; Guinet, 1991). En particular, en la industria de tejidos técnicos las máquinas paralelas tienden a ser no relacionadas, tanto por la dinámica que tienen las empresas en su crecimiento que hace que convivan tecnologías de diferentes épocas, como por la necesidad de responder a diferentes necesidades de los clientes, lo que implica equipar algunas de las máquinas con características particulares que cubran esos requerimientos haciéndolas diferentes de las otras máquinas de la misma etapa.

1.2.2.2 Tiempo de montaje dependiente de la secuencia

Se considera que el tiempo de montaje es dependiente de la secuencia cuando la duración de la operación de montaje o cambio de un trabajo a otro en una máquina o en un proceso de producción, varía sensiblemente según la relación que haya entre el trabajo que termina y el que inicia inmediatamente después. (Allahverdi, Gupta, & Aldowaisan, 1999). Esta situación se presenta en la industria de tejidos técnicos. En el proceso de tejeduría, si el trabajo que se va a montar es similar al anterior, basta hacer un anudado que puede durar solo una cuarta parte de lo que duraría un montaje de un trabajo completamente diferente al que fue procesado con anterioridad. Situaciones similares ocurren en el urdizaje, la preparación de hilos y los acabados.

1.2.2.3 Lotes de transferencia

Un lote de transferencia es una partida de producción o un *batch* que sale de una máquina o un proceso productivo, para alimentar el proceso siguiente. Cuando los lotes de transferencia coinciden con el tamaño de lote a despachar al cliente y el tamaño permanece constante a lo largo del proceso, se dice que son lotes uniformes. Si existe la posibilidad de subdividir el trabajo en lotes más pequeños que permiten el procesamiento paralelo en varias máquinas, y las entradas parciales al siguiente proceso, se dice que se tienen lotes de transferencia no uniformes. (Zhang et al, 2005). En éste último caso, los tamaños de lote dependen más de las capacidades individuales de las máquinas que de las órdenes de producción. Es un caso que se da en casi todas las etapas del proceso textil; en especial en los tejidos técnicos que pueden tener diferentes tamaños de lote a diferencia de las telas para vestuario que generalmente corresponden a piezas de tela de tamaño estándar.

1.2.2.4 Maleabilidad

Un trabajo de producción es maleable cuando tiene la propiedad de poderse dividir en varios trabajos o varias órdenes de producción, permitiendo el procesamiento simultáneo en varias máquinas paralelas. También es maleable si puede integrarse con otros trabajos en un solo lote permitiendo el procesamiento simultáneo de dos o más trabajos en el mismo recurso productivo. En general, se considera la maleabilidad como la posibilidad de modificar la subdivisión de un lote a lo largo del proceso productivo (Sadykov, 2012). Los trabajos en la producción de tejidos técnicos son maleables, permitiendo dividir lotes para aprovechar mejor el paralelismo de algunas etapas del proceso y propiciando economías de escala integrando múltiples lotes en otras.

1.2.2.5 Entrada Dinámica

Se entiende que existe entrada dinámica a la programación de la producción cuando se considera que al momento de hacer la programación, existe una producción programada previamente cuyo desarrollo está en marcha, y por lo tanto, los recursos pueden estar ya ocupados o comprometidos para programaciones hechas con anterioridad. De igual manera, la programación tiene entrada dinámica cuando las órdenes o pedidos van entrando al proceso a medida que son generados por los clientes, añadiéndose a la programación previamente elaborada, así como cuando se consideran fechas de disponibilidad de las máquinas diferentes de la fecha inicial de programación, debido a mantenimientos programados. Considerando la diversidad de tamaños de lote y de tiempos de proceso que se dan en la industria de tejidos técnicos, resulta mucho más ajustado a la realidad suponer entrada dinámica de trabajos que modelar una planta completamente disponible desde la hora cero de la programación. Al considerar la entrada dinámica se genera una programación que no sólo es proactiva (previa a la ejecución) sino también reactiva (que permite reaccionar a los cambios).

1.2.2.6 Restricción de elegibilidad

No todas las máquinas pueden procesar todos los trabajos ni todos los trabajos pueden ser procesados en cualquier máquina dentro de cada etapa. Esta condición proviene de las especificaciones particulares de los productos y las capacidades especiales de las máquinas y es común en entornos como el de la producción de tejidos técnicos donde se requieren configuraciones técnicas diferentes para fabricar tejidos de características diferentes tanto por su diseño como por su posterior utilización.

1.2.2.7 Más de dos etapas

Independientemente del número de etapas que se encuentren en las configuraciones reales de producción, es posible que el número de etapas que se consideren en un modelo de programación sea sólo de una o dos, subordinando el resto del proceso a la secuencia óptima para una o dos etapas críticas. En el caso de la programación de tejidos técnicos, cuando hay integración vertical y paralelismo en la mayoría de sus etapas es necesario tener en cuenta tantas etapas como sea posible y práctico, para que la programación considere las condiciones de maleabilidad y lotes de transferencia que pueden causar perturbación en la continuidad del flujo del proceso.

1.2.2.8 Función objetivo considerando fecha de entrega o costos

La función objetivo clásica de los trabajos académicos de programación de producción tiene que ver con la minimización del *makespan* (máximo tiempo de procesamiento total). Pese a su uso generalizado y su relación teórica con la eficiencia dado que al minimizar el máximo tiempo de procesamiento se busca un mejor uso de los recursos, acortando esperas tanto para el material como para las máquinas; en especial para entornos como el de tejidos técnicos donde prima el modelo *make-to-order* (fabricar bajo pedido), el *makespan* tiene la debilidad de no considerar en el cálculo de la función objetivo las fechas de entrega prometidas al cliente (sólo en algunos casos se tienen en cuenta como restricción). El costo, igualmente, es una variable importante a optimizar en la mayoría de las empresas y generalmente está asociado a un mejor aprovechamiento del equipo productivo.

1.2.2.9 Datos basados en entornos reales

En el modelado de la programación de producción se puede trabajar con datos generados con números aleatorios provenientes de suposiciones del investigador o de conjuntos de valores arbitrario, como se puede ver en la mayoría de los artículos que proponen soluciones a los problemas de secuenciación de tareas. Es más realista considerar conjuntos de datos que sean extraídos de un entorno de producción, o que al menos se hayan simulado basados en el comportamiento de las variables en esos entornos. De esta manera el modelado podrá probar su efectividad con conjuntos de valores proporcionales a los que se presentarían en su uso para programar trabajos a procesar en una planta de producción verdadera.

1.2.3 Las técnicas inteligentes

Con el desarrollo de las capacidades de cómputo, han proliferado las técnicas llamadas “inteligentes” para la solución de un amplio rango de problemas en los que los métodos exactos tienen limitaciones, en especial de eficiencia computacional, para resolverlos. A continuación se reseñan algunas de las más utilizadas en solución de problemas de programación de la producción

1.2.3.1 Metaheurísticas

Están basadas generalmente en fenómenos naturales o en conocimientos científicos. Son técnicas de optimización que, si bien no garantizan la solución óptima ni permiten determinar qué tan cerca se encuentran sus soluciones de la solución óptima, permiten encontrar soluciones de alta calidad, en tiempos de cómputo razonables, para problemas

en los cuales las técnicas exactas no son eficientes o no logran encontrar la solución del problema. (Gallego et al., 2006)

1.2.3.1.1 Algoritmos Genéticos

Son algoritmos inspirados en la evolución natural de las especies. Se fundamenta en el hecho de que existe competencia entre los individuos de una especie para su reproducción y en la cual son importantes dos aspectos: la diversidad genética y la interacción con un medio ambiente asociado a factores problemáticos o adversos, favoreciendo a los individuos mejor dotados. El resultado final es la evolución. Parten de un conjunto de soluciones generadas por algún procedimiento (determinístico, aleatorio o una mezcla de los dos), denominada población inicial, y de ese conjunto de soluciones se selecciona un grupo de individuos para realizar un intercambio de las informaciones codificadas en sus genes y obtener a partir de allí nuevos individuos (soluciones candidatas). Este proceso se denomina recombinación. Luego de la recombinación se realiza un procedimiento denominado mutación que consiste en un cambio inesperado de alguna característica. Los individuos resultantes compiten entre sí para hacer parte de la nueva población. El procedimiento se repite hasta que se cumpla un criterio de parada que puede ser el cumplimiento de un número de generaciones predeterminado o la diferencia entre dos soluciones óptimas consecutivas. Un algoritmo genético puede aplicarse a problemas lineales y no lineales, con codificación binaria, entera o real y es especialmente adecuado a aquellos casos en que se combinan características de no linealidad, presencia de variables continuas y enteras, y un elevado número de variables y restricciones (Gallego et al., 2006).

1.2.3.1.2 Colonia de Hormigas

Es un procedimiento inspirado en la observación de los insectos que le dan su nombre. Las soluciones posibles del problema son caminos sobre los que las hormigas segregarán sus feromonas de tal manera que otras hormigas los sigan. Los mejores caminos tendrán más feromonas lo que reforzará que más hormigas los recorran. Los caminos que no son muy recorridos pueden borrarse de la memoria colectiva por causa de la evaporación de las feromonas. Cuando se cumple el criterio de parada, se llega a una solución de muy buena calidad. Se aplica a diferentes tipos de problemas, en especial a problemas como el del agente viajero y programación cuadrática. (Gallego et al., 2006).

1.2.3.1.3 Recocido Simulado

Está basado en el proceso termodinámico de calentamiento de un sólido seguido de un enfriamiento para llegar a un estado óptimo de cristalización. Una configuración de las variables es una solución factible, la estructura óptima del sistema es la solución óptima del problema, la energía requerida es el costo de la solución y la temperatura es el grado

de aleatoriedad. Se ha aplicado a problemas como el de asignación de rutas de vehículos. (Gallego et al., 2006)

1.2.3.1.4 Búsqueda Tabú

Es una técnica basada en limitar el proceso de búsqueda de soluciones, excluyendo algunas alternativas y modificando las probabilidades de selección de otras. La búsqueda se concentra en una vecindad que se modifica en cada iteración, seleccionando como solución óptima la mejor que se encuentre en cada "vecindario" y ajustando los costos asociados a cada elemento de los examinados. (Colorni et al., 1996)

1.2.3.1.5 Agentes Inteligentes

Un Agente es un ente con capacidad de computación que en cierto entorno es capaz de actuar con autonomía y cierta libertad para alcanzar sus objetivos. Es consciente de su entorno y es capaz de percibir los cambios en el mismo y de actuar en consecuencia sobre él. Un Agente es todo Sistema Informático que tiene a la vez: autonomía, sociabilidad, reactividad e iniciativa. Se llama inteligente cuando además tiene: movilidad, veracidad, benevolencia y racionalidad. (Gómez Gasquet, 2010)

Un sistema basado en agentes utiliza los Agentes como elementos de abstracción para representar su modelo. Puede estar configurado por uno o más Agentes. Un Sistema Multiagente está concebido desde su diseño como un conjunto de elementos que interactúan entre sí para alcanzar un objetivo de forma asociada. (Gómez Gasquet, 2010).

1.2.3.1.6 Otros

Otras técnicas que se han aplicado a problemas de programación de producción cercanos a la industria textil, son: Búsqueda de la armonía, Búsqueda en vecindario variable, Búsqueda Local Interactiva, Enjambre de partículas, Algoritmos Inmunes, y Algoritmos Voráces.

1.3 Estado del arte

A continuación se relacionan en tres niveles, los resultados de la exploración bibliográfica sobre trabajos relacionados con la programación de la producción. En primer lugar se muestra la evaluación sobre los problemas de programación de producción en entornos afines a la fabricación de tejidos técnicos sobre una exploración que abarcó desde 1990 hasta el 2015, luego se aborda la situación del modelado de condiciones realistas en esos mismos entornos evaluada entre el 2010 y el 2015 y finalmente se presenta el

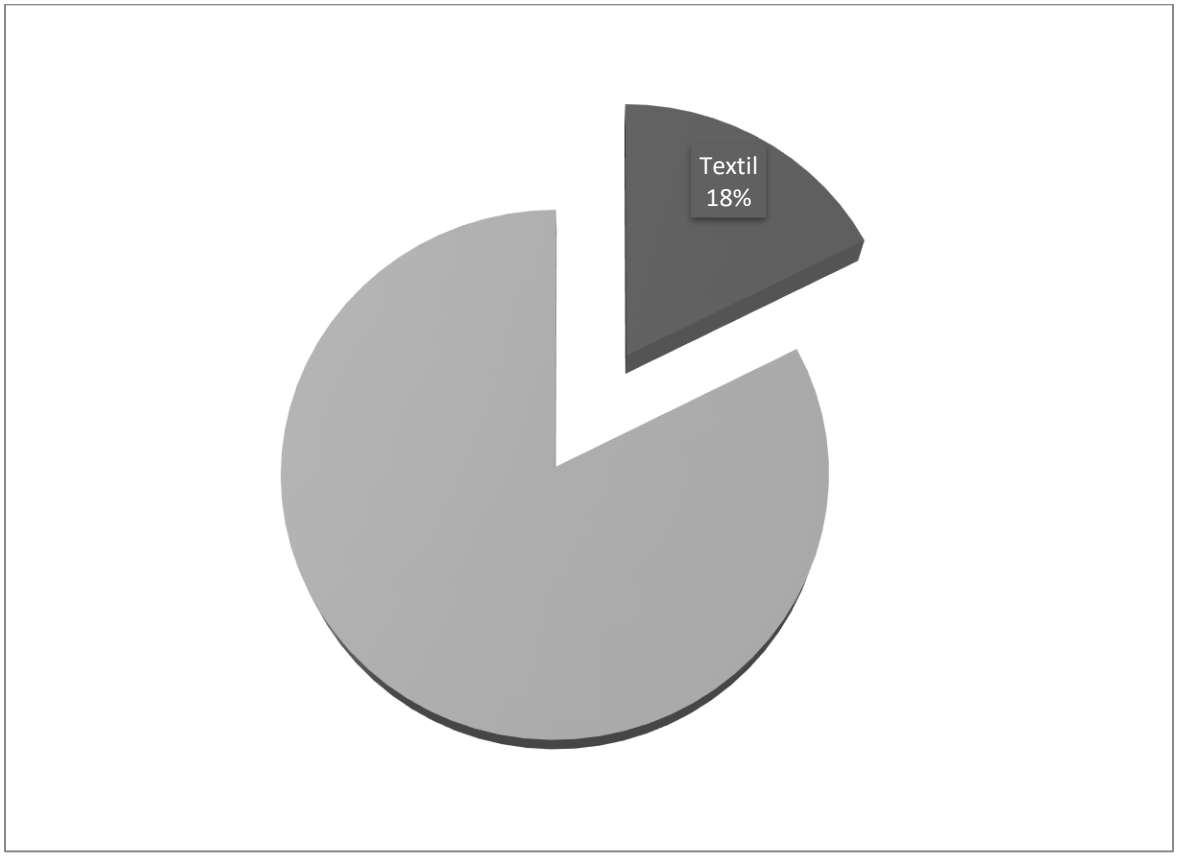
análisis de los trabajos dedicados a la configuración específica de la industria de tejidos técnicos: el flow shop híbrido flexible. Los trabajos sobre ese tema se han publicado entre 2008 y 2015.

1.3.1 Estado del arte de las técnicas de programación de producción en entornos relacionados con el de producción de tejidos técnicos

Se realizó una revisión de 291 artículos científicos, publicados entre 1990 y 2015, cuyo tópico se centra en las técnicas inteligentes aplicadas a problemas de optimización de sistemas productivos, específicamente problemas de secuenciación de tareas. Se buscaron en las bases de datos científicas Scopus, Science Direct, Jstor, Taylor & Francis, IEEE Explore, ProQuest y Web of Science, publicaciones sobre Flow Shop, Flow Shop Híbrido, Flow Shop Híbrido Flexible, Máquinas Paralelas e Industria textil. Se filtraron y se seleccionaron artículos de interés para el tema de estudio, considerando el tipo de problema o la aplicación de sus resultados. En el análisis se tabularon las principales variables de interés obteniendo la información que se muestra en el Anexo D (página 105) y se describe a continuación:

En la Figura 1-3 se puede ver la proporción los trabajos que mencionan alguna posible aplicación en la industria textil.

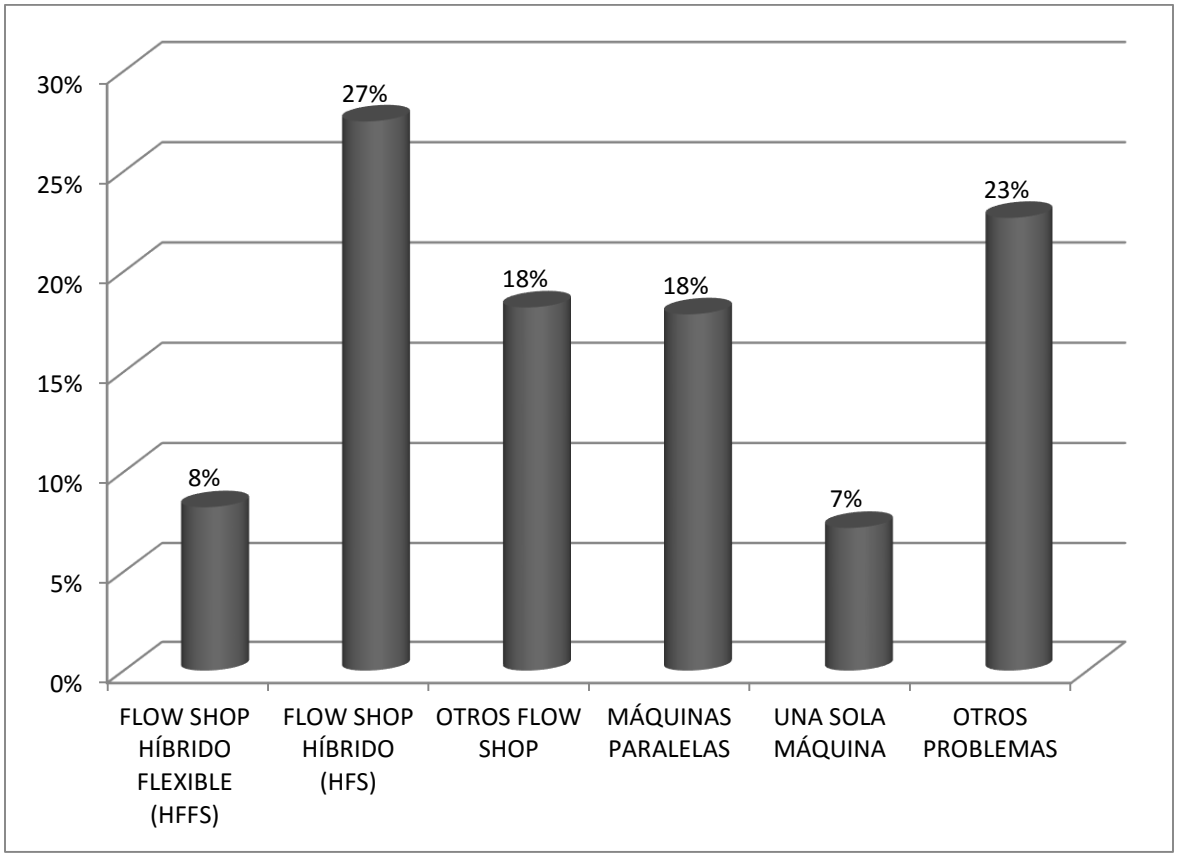
Figura 1-3 Proporción de trabajos que mencionan su aplicación a la industria textil



No se encontró ningún trabajo que mencionara explícitamente el subsector de Tejidos Técnicos. Los que hicieron alguna mención de posibles aplicaciones en la industria textil son una minoría, menor a la quinta parte de todos los trabajos considerados.

En la Figura 1-4 se muestran los tipos de problemas analizados en los trabajos y su participación en el total. La suma es superior al 100% dado que hay publicaciones en las que se mencionan a la vez soluciones a más de un problema de secuenciación.

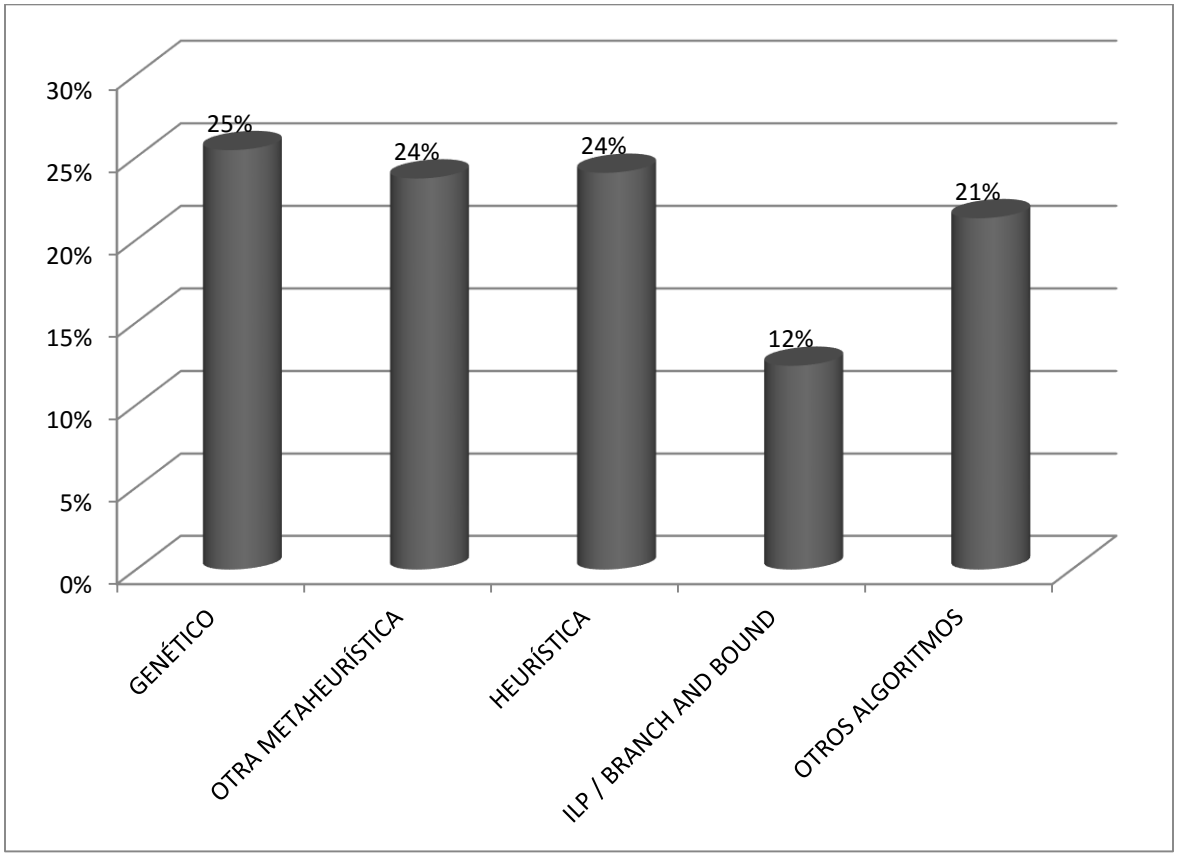
Figura 1-4: Tipos de problemas estudiados en los artículos sobre secuenciación revisados para el estado del arte.



El entorno específico aplicable a la industria de tejidos técnicos (y a la industria textil en general), el *flow shop* híbrido flexible, sólo aparece modelado en el 8% de los trabajos. Si bien el resto de artículos tratan problemas relacionados con situaciones que se pueden presentar en este tipo de industrias, se aprecia una escasa consideración de ese tipo de entornos. Los que aparecen con mayor frecuencia son los HFS (*flow shop* híbrido) que según (Romano, Salort, & Esteban, 2002; Ruiz, 2009) son los más probables en la producción real donde no abundan ni los talleres de flujo con una única máquina por etapa, ni una única etapa con máquinas paralelas.

La Figura 1-5 compara la utilización de algoritmos de solución en los trabajos de secuenciación presentados en los artículos analizados. Como, en repetidos casos, los investigadores suponen más de una estrategia de solución para un mismo problema, la suma de los porcentajes mostrados en la figura es superior al 100%.

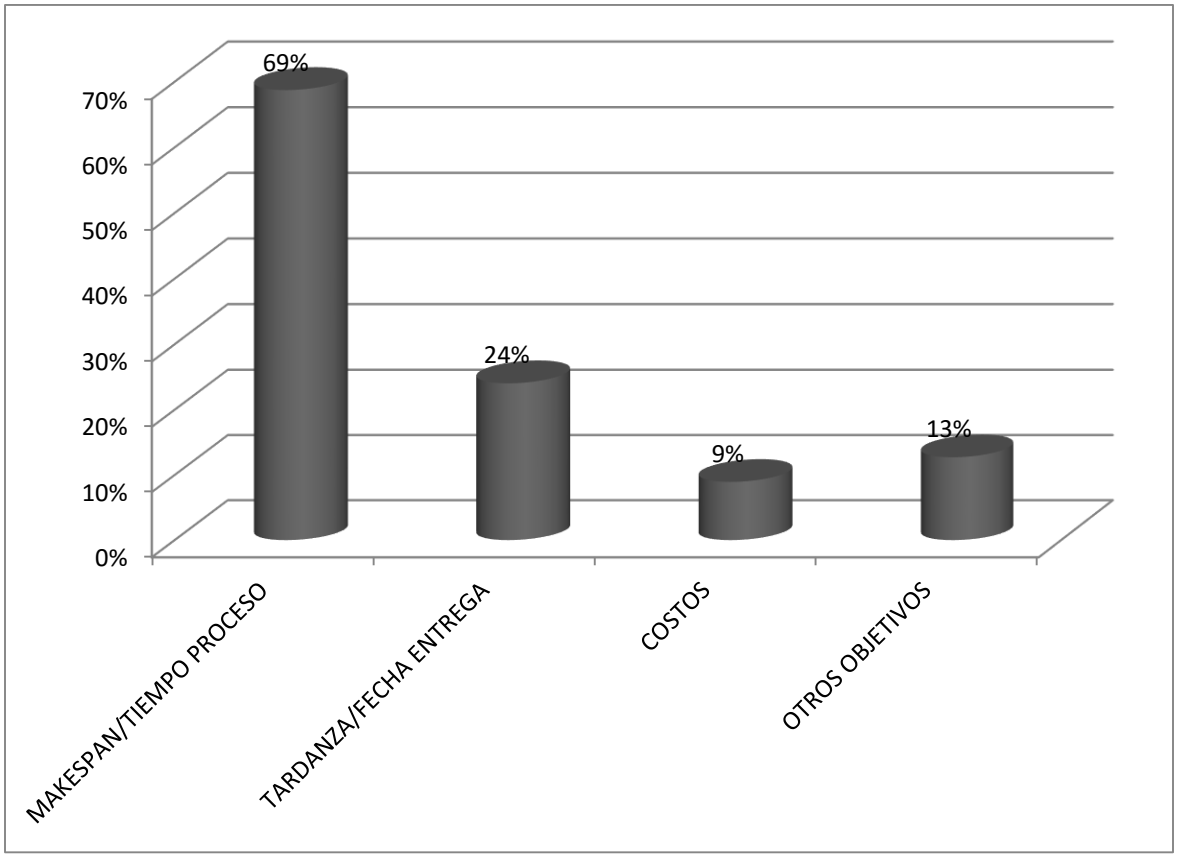
Figura 1-5: Algoritmos de solución aplicados a problemas de secuenciación



Los algoritmos genéticos cuya efectividad y eficiencia ya ha sido probada en varios campos, por su sencillez, adaptabilidad y capacidad de llegar a soluciones óptimas (Solari Dufour & Ocampo Edye, 2007); sobresalen como la técnica de solución más utilizada, seguida de cerca por el conjunto de las otras metaheurísticas o técnicas inteligentes (Búsqueda tabú, sistemas multiagente, GRASP, Colonia de Hormigas, Partículas swarm, recocido simulado) y por el grupo de heurísticas constructivas de diferentes clases. Son minoría las aplicaciones de técnicas exactas como la programación lineal entera con algoritmos como el branch and bound que por su alto costo computacional solo son aplicables a instancias muy pequeñas de este tipo de problemas.

La Figura 1-6 presenta los porcentajes de participación de los diferentes tipos de función objetivo en los trabajos de secuenciación reportados en la literatura consultada. Al haber problemas que se trabajaron con técnicas multi-objetivo se presenta nuevamente el caso de una suma total superior al 100%.

Figura 1-6: Porcentaje de aplicación de funciones objetivo en trabajos de secuenciación.



Coincidiendo con (Maravelias & Sung, 2009) y otras revisiones de literatura, la minimización del máximo tiempo de procesamiento, conocida como *makespan* es la función objetivo más común en los trabajos de secuenciación. La minimización de tardanza o precocidad y otros objetivos que consideran fecha de entrega sólo se consideran en la cuarta parte de todos los trabajos.

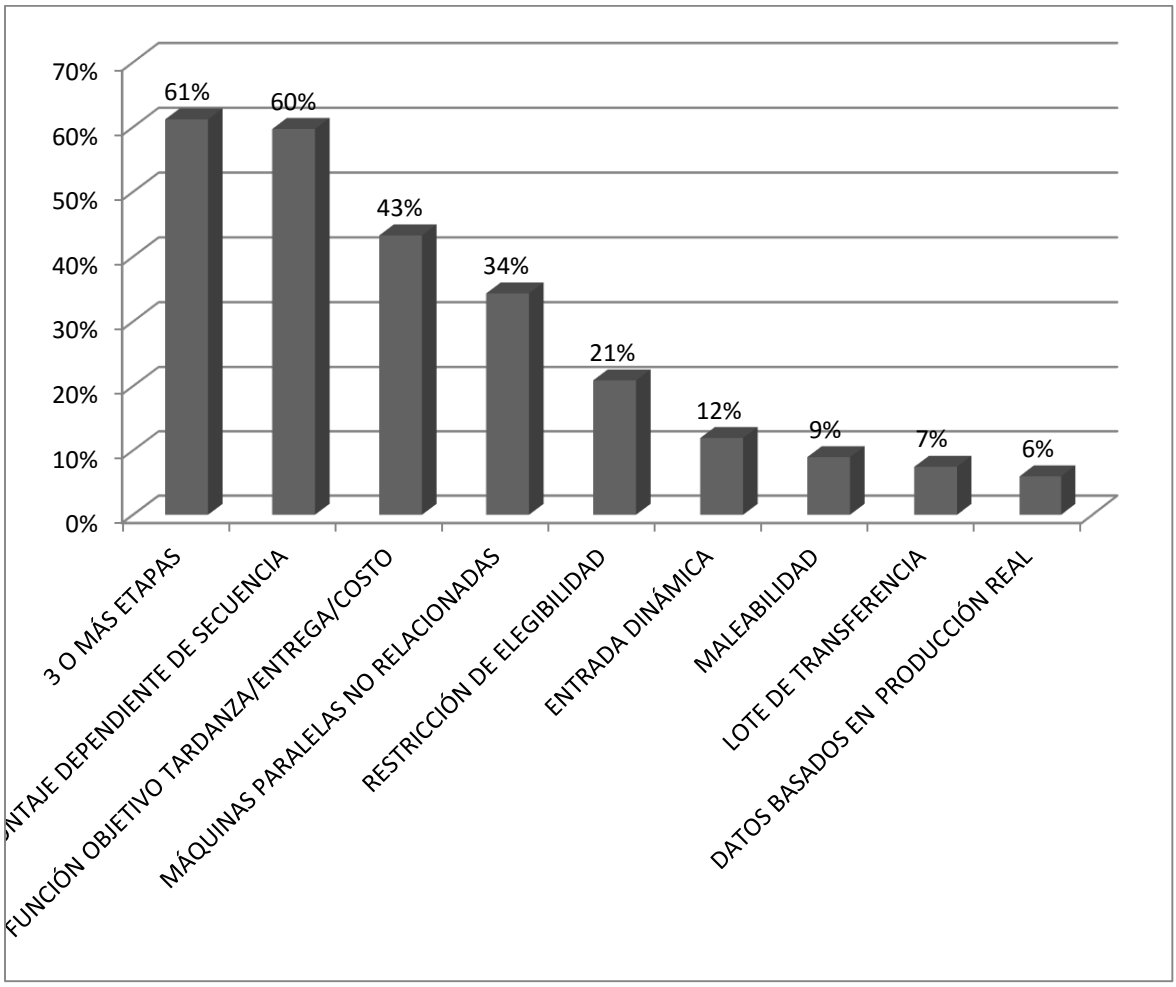
1.3.2 Estado del Arte de aplicación de condiciones realistas en problemas de programación de producción afines a la industria de tejidos técnicos

En una revisión que incluyó un total de 67 artículos científicos publicados entre los años 2010 y 2015, y disponibles en las bases de datos: Scopus, Science Direct, Jstor, Taylor & Francis, IEEE Explore, ProQuest y Web of Science, cuya temática estaba relacionada con programación en entornos afines al de la producción de tejidos técnicos, tales como las máquinas paralelas, *flow shop*, *flow shop* híbridos y *flow shop* híbridos flexibles, se analizó el modelado de las condiciones realistas en programación de producción

expuestas en la sección 1.2.2 (página 24). Los detalles del análisis se pueden encontrar en el Apéndice E (página 112) y se resumen a continuación:

La Figura 1-7 muestra el porcentaje de los trabajos que tuvieron en cuenta cada una de las condiciones de entorno real en el conjunto de trabajos analizados.

Figura 1-7: Condiciones realistas consideradas en los trabajos de programación de producción



Aparte del número de etapas mayor o igual a 3, solo los tiempos de montaje dependientes de la secuencia superan el 50% en la proporción de trabajos que los consideran para modelar la programación de la producción, confirmando la afirmación de (Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010) acerca del aumento reciente del interés en los tiempos de cambio sensibles al orden de procesamiento. Condiciones realistas como las relacionadas con la maleabilidad, los lotes de transferencia variables, la entrada dinámica de trabajos y el uso de datos basados en producción de empresas reales sólo están presentes en menos del 10% de los trabajos analizados.

(Linn & Zhang, 1999; Ribas, Leisten, Framiñan, et al., 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010) hacen un recorrido similar sobre este tipo de problemas en un rango de tiempo más amplio anterior al 2010, llegando a conclusiones similares a las aquí presentadas. La muestra del 2010 al 2015 confirma las apreciaciones de los artículos mencionados acerca de la distancia entre realidad y teoría en los trabajos de programación de producción.

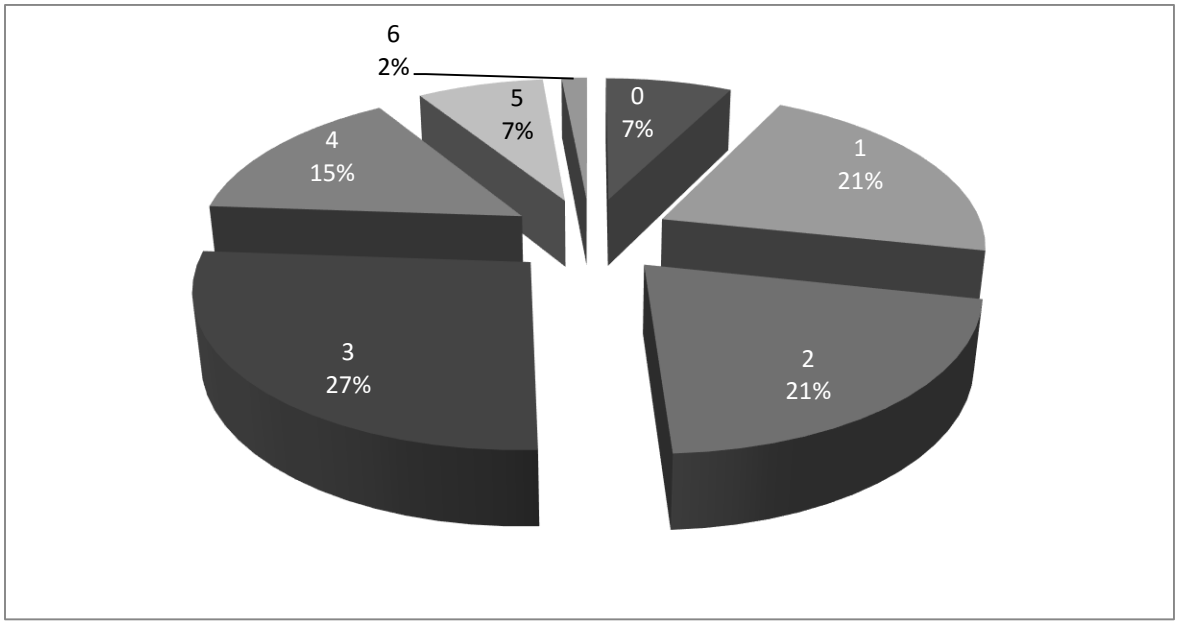
En las revisiones bibliográficas de (Linn & Zhang, 1999; Ribas, Leisten, Framiñan, et al., 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010) se menciona que las máquinas paralelas idénticas es el caso más estudiado en el tema de paralelismo, bien sea en una sola etapa o como parte de un modelo híbrido. El más probable en la realidad (las máquinas paralelas no relacionadas) es minoría en el modelado del paralelismo.

El 43% tuvo funciones objetivo relacionadas con la fecha de entrega (mínima tardanza/anticipación) o con los costos, a veces en problemas multi-objetivo en los que también se minimizaba el máximo tiempo de procesamiento (*makespan*), que al igual que en la revisión sobre el modelado mostrada en la Figura 1-6, es el objetivo más frecuente en los trabajos de programación de producción

La mayoría de los trabajos revisados (así como los reseñados por (Linn & Zhang, 1999; Ribas, Leisten, Framiñan, et al., 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010)), son deficientes en la consideración de las dificultades propias de los entornos productivos reales.

La Figura 1-8 muestra cuantas de las 9 condiciones realistas de producción fueron consideradas simultáneamente en los trabajos. Los valores porcentuales representan la proporción de artículos que modelaron a la vez la cantidad de condiciones realistas indicada en la figura.

Figura 1-8: Distribución porcentual del número de condiciones realistas consideradas simultáneamente en los artículos científicos sobre programación de producción.



La mitad de los trabajos modela a la vez 2 condiciones realistas o menos. Menos del 10% de las investigaciones modelan simultáneamente 5 o más condiciones realistas. Aunque se confirma la tendencia al modelado realista de los problemas de secuenciación, aun predominan las simplificaciones que alejan la posibilidad de utilizar los modelos propuestos en los entornos productivos reales, como se estableció al definir el vacío de conocimiento. Se resalta que el presente trabajo incluye 9 condiciones realistas consideradas conjuntamente.

1.3.3 Estado del arte de la programación de producción en entornos *flow shop* híbrido flexible

La primera referencia explícita al problema de secuenciación de producción en ambiente *Flow Shop* híbrido flexible es el trabajo de (Ruiz, Şerifoğlu, & Urlings, 2008) basado en la programación de una industria cerámica. Es mencionado en artículos de revisión de literatura del 2010 sobre el tema de secuenciación, como (Ribas, Leisten, Framiñan, et al., 2010; Ruiz & Vázquez-Rodríguez, 2010).

Usando los motores de búsqueda de las bases de datos científicas: Scopus, Science Direct, Jstor, Taylor & Francis, IEEE Explore, ProQuest y Web of Science con la expresión "*Hybrid Flexible Flowshop*" o la expresión "*Hybrid Flexible Flow*" en el título, el

resumen y las palabras clave, se han encontrado un total de 22 artículos publicados en revistas científicas y en memorias de conferencias[1].

Diez de los 22 artículos son producto del equipo de trabajo del profesor Rubén Ruiz, apareciendo como autores o coautores, tanto él mismo (3 artículos) como sus colegas Zandieh (7 artículos), Naderi (2 trabajos), Karimi (2 trabajos), Urlings (2 trabajos), Şerifoğlu (2 trabajos), entre otros. En el trabajo inicial (Ruiz et al., 2008) se plantea el problema considerando varias condiciones realistas como: máquinas paralelas no relacionadas, tiempos de montaje dependientes de la secuencia, entrada dinámica, elegibilidad y más de 2 etapas; se desarrolla el set de datos y se aplica un algoritmo exacto modelado en CPLEX para resolverlo. Como el trabajo está orientado a la industria cerámica, el modelo considera restricciones de espera y anticipación de trabajos propias de esa industria. No se consideran ni la maleabilidad, ni el lote de transferencia variable, ni función objetivo basada en plazo de entrega, ni datos basados en la realidad.

En los restantes trabajos del grupo se proponen algoritmos genéticos con diferentes variaciones en la estructura del algoritmo, en los operadores de cruce y en las reglas de asignación, para un modelo de datos muy similar al original: algoritmo genético básico en (Zandieh et al., 2010); de estado estable cambiando opciones de asignación (SGA, SGAR, SGAM y EGA) en (Urlings, Ruiz, & Şerifoğlu, 2010); MPGA (*Multi-phase*) en (Zandieh & Karimi, 2010) y en (Karimi, Zandieh, & Karamooz, 2010); RKGA (*Random key*) en (Jabbarizadeh, Zandieh, & Talebi, 2009; Zandieh, Dorri, & Khamseh, 2009) y RKGA (Random Key) con simulación en (Zandieh & Hashemi, 2015). También hay un trabajo (Naderi, Ruiz, & Zandieh, 2010) que aplica la heurística de Nawaz, Enscore and Ham conocida como NEH y otro (Naderi, Gohari, & Yazdani, 2014) que utiliza PSO (*Particle Swarm Optimization*).

Cuatro trabajos más son producto del equipo conformado por Sioud, Gagné y Gravel quienes entre 2013 y 2014 probaron diferentes técnicas inteligentes para resolver el mismo set de datos generado por (Ruiz et al., 2008) y disponible en http://soa.iti.es/instancias-problemas. El primero de los trabajos fue un algoritmo genético (Sioud, Gravel, & Gagné, 2013) y luego modelaron técnicas como la Colonia de Hormigas (Sioud, Gagné, & Gravel, 2014a, 2014b) y la búsqueda local (Sioud, Gagné, & Gravel, 2014c). En este último generaron un nuevo set de datos y cambiaron la función objetivo por la minimización de la tardanza total.

Otro equipo, encabezado por De Siqueira, también trabajó sobre el set de datos inicial y por lo tanto sobre la misma configuración propuesta por (Ruiz et al., 2008). Su propuesta (De Siqueira, Souza, De Souza, De Franca Filho, & Marcelino, 2013) es un algoritmo

[1] Se han excluido intencionalmente 2 productos previos de esta investigación que aparecen en la búsqueda en la base de datos Scielo.

evolutivo. Al igual que Sioud, De Siquiera comparó sus resultados con los obtenidos por el equipo de Ruiz en 2008. En total 15 artículos (el 68%) pertenecen al grupo de trabajo de Ruíz o se relacionan directamente con éste, por estar basados en su formulación del problema.

Dos artículos pertenecen al grupo de Attar que propone los algoritmos BBO (*Biogeography Based Optimization*) (Attar, Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam, & Yaghoubi, 2013) y PSO (*Particle Swarm Optimization*)(Attar, Mohammadi, & Tavakkoli-Moghaddam, 2013). Su aporte está en el modelado de la condición de tiempo limitado de espera entre dos etapas consecutivas, propio de varias industrias como la de semiconductores y la petroquímica.

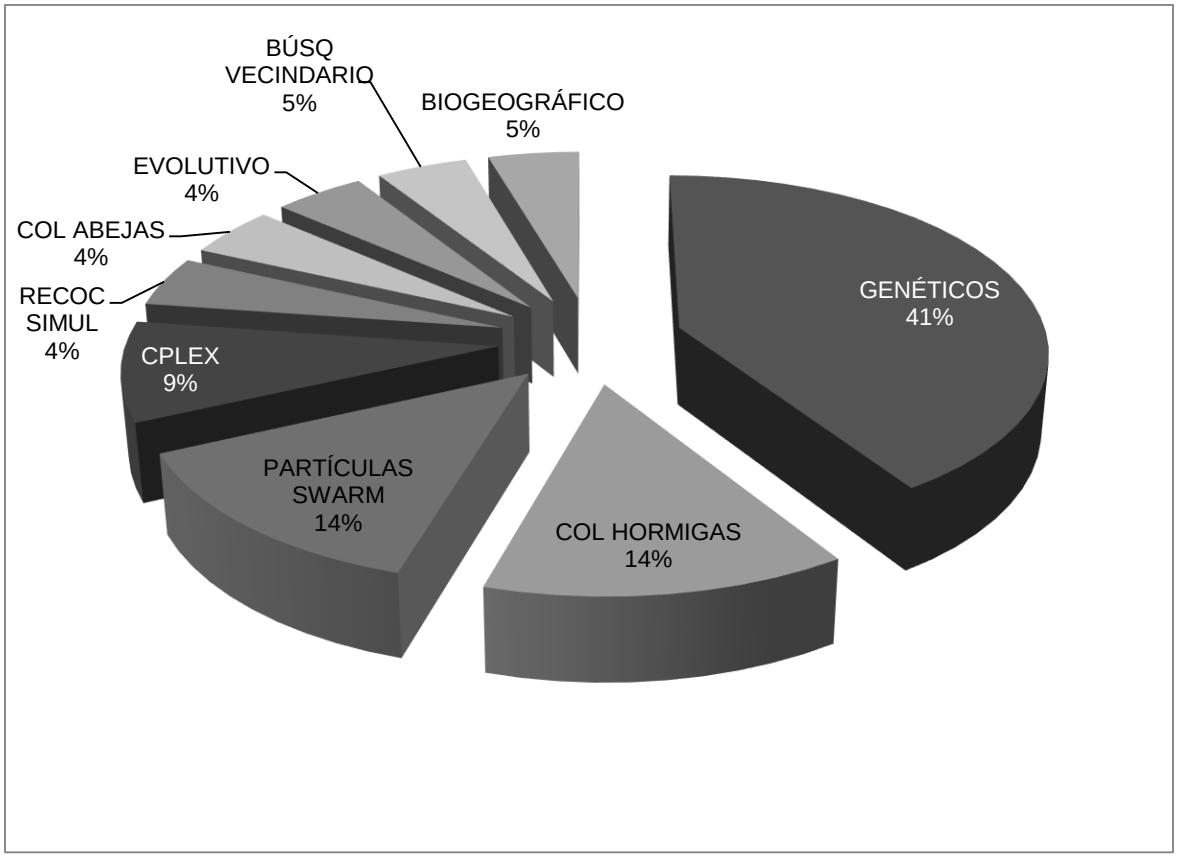
Otros 2 artículos tienen como autor principal a Fatahum Defersha quien hace un modelado muy completo considerando hasta 5 condiciones realistas en un mismo trabajo. Su principal aporte es el modelamiento de la subdivisión de lotes, que tiene que ver con la maleabilidad. En (F. Defersha, 2011) se hace énfasis en el modelado, limitando la experimentación a una sola instancia y calculando la solución con CPLEX sin comparar los resultados frente a otras alternativas. En (F. Defersha & Chen, 2012) se trabaja un problema de menor complejidad (no hay restricción de elegibilidad ni entrada dinámica) con un algoritmo genético, probado sobre un conjunto de 11 instancias pequeñas del problema con entre 2 y 30 trabajos a programar en un sistema con entre 3 y 30 etapas con entre 1 y 5 máquinas paralelas idénticas por etapa.

Los restantes 3 artículos son trabajos independientes: (Solano Charris, 2009) propone una colonia de hormigas para un *Flow shop* híbrido flexible sin considerar ninguna condición de entorno realista, probando la propuesta en una sola instancia de 8 trabajos en 2 etapas con 1 y 2 máquinas idénticas. (Yalaoui, Mahdi, Amodeo, & Yalaoui, 2011) aplica PSO a un problema con máquinas paralelas no relacionadas, k etapas, restricción de elegibilidad y objetivo de minimizar tardanza, probándolo con 125 instancias pequeñas de 10 trabajos en un sistema de 2 etapas con 5 máquinas por etapa. El trabajo más reciente es el de(J. Li, Pan, & Duan, 2015) quienes proponen un algoritmo de colonia de abejas para resolver un problema basado en un entorno real de una industria siderúrgica minimizando tardanza para 15 instancias con entre 40 y 152 trabajos a programar en una planta real de 5 etapas con entre 2 y 5 máquinas por etapa.

Se encontró como común denominador en la justificación de los trabajos analizados, el énfasis en buscar modelos más cercanos a la realidad de la industria tratando de acortar la brecha entre las propuestas teóricas y las aplicaciones prácticas. El Anexo F (página 115) incluye la tabla completa del análisis de esos trabajos cuyos resultados se resumen a continuación.

La Figura 1-9 muestra los algoritmos propuestos para la solución del *Flow Shop* híbrido flexible y su participación porcentual en el total de trabajos analizados.

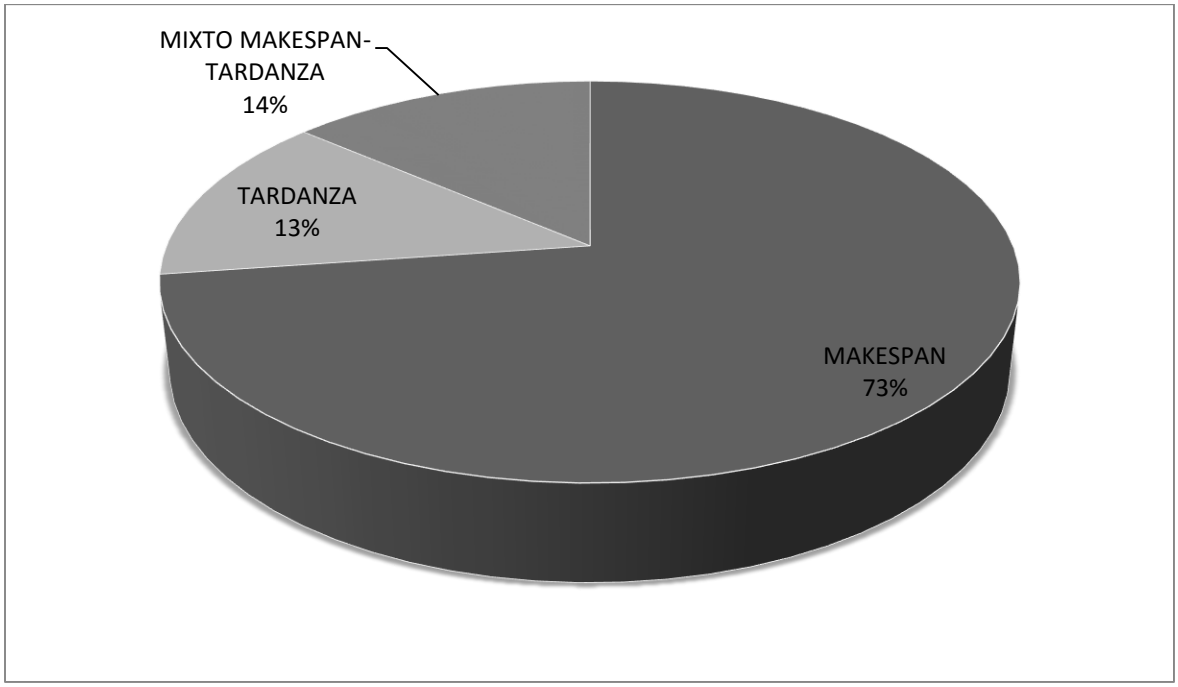
Figura 1-9: Algoritmos propuestos para la secuenciación en *Flow Shop* Híbrido flexible



En el problema específico del *Flow Shop* híbrido flexible se nota una mayor utilización de los algoritmos genéticos, superando incluso la proporción mostrada en la Figura 1-5 para el conjunto de problemas de secuenciación en entornos afines al de producción de tejidos técnicos, lo que se puede explicar por su flexibilidad y adaptabilidad a diferentes tipos de problemas. El grupo de Zandieh, Ruiz, Naderi, Urlings, Karimi los utiliza en la mayoría de sus propuestas de solución. Incluso, en la comparación de resultados frente a otras propuestas, los algoritmos genéticos son los más utilizados (41% de los casos), seguidos por las reglas de prioridad básicas (27% de los casos). Cabe anotar además que dos de los artículos no hicieron comparaciones frente a otros algoritmos y que sólo los trabajos del grupo de Sioud y (De Siqueira et al., 2013) compararon sus resultados con los de otros investigadores (Concretamente con los trabajos iniciales del grupo de Rubén Ruiz). (Yalaoui et al., 2011) comparó sus resultados con el óptimo global, dado que trabajó sobre instancias muy pequeñas que permitieron resolverlas por enumeración explicita.

La Figura 1-10 muestra la proporción entre los tipos de objetivos usados en la solución de problemas de secuenciación *Flow Shop* Híbrido Flexible.

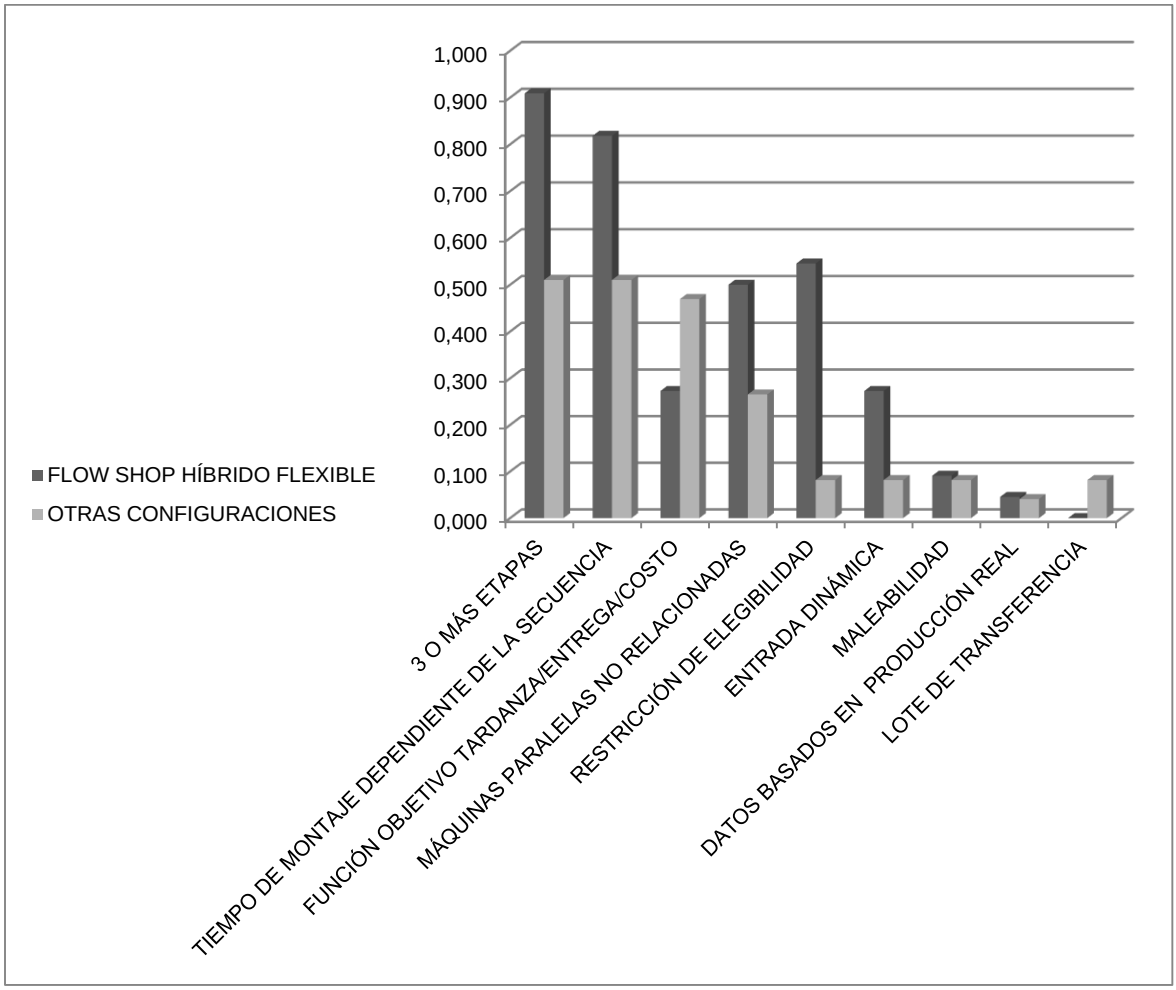
Figura 1-10: Tipos de funciones objetivo en problemas de secuenciación *Flow Shop* híbrido flexible



Como ya se había visto en el análisis de la literatura sobre secuenciación de producción en entornos relacionados con la industria de tejidos técnicos, el *makespan* es el objetivo modelado con mayor frecuencia (Ver Figura 1-6, página 34). En este caso, llega al 73% de los trabajos, además del 14% que trabajó algoritmos multi-objetivo en los que se minimizó *makespan* junto con otro objetivo relacionado con la tardanza. La tardanza, independientemente, cubrió el restante 13% de los trabajos.

La Figura 1-11 resume los resultados referentes al modelado de condiciones de entorno real en los trabajos sobre la configuración *flow shop* híbrido flexible en comparación con el resto de configuraciones.

Figura 1-11: Porcentaje de trabajos que modelan cada una de las condiciones de entorno real en configuración *flow shop* híbrido flexible vs otras configuraciones.



Es notable la tendencia de reducir la distancia entre la teoría y la realidad en los trabajos sobre la configuración *flow shop* híbrido flexible. El número de etapas mayor a 2, los tiempos de montaje dependientes de la secuencia, el paralelismo entre máquinas no relacionadas, la restricción de eligibilidad y la entrada dinámica son modelados con una frecuencia mucho mayor en el entorno *flow shop* híbrido flexible que en los otros entornos reportados en la literatura. Las cuatro primeras de esas condiciones se pueden encontrar en más de la mitad de los trabajos acerca de esa configuración. En el modelado de función objetivo relativa al tiempo de entrega o costo, sin embargo, los trabajos sobre *flow shop* híbrido flexible están por debajo de los relativos a otras configuraciones, notándose un predominio de los trabajos que optimizan el *makespan*. En las condiciones relativas a los lotes de transferencia, maleabilidad y datos basados en la realidad, el modelado es tan escaso en esta configuración como en las otras que se analizaron. En particular, la consideración de lote de transferencia variable entre etapas, propia de la industria de tejidos técnicos y de otras industrias de la configuración *flow shop* híbrido flexible, no se ha modelado nunca en los trabajos de secuenciación sobre

este tipo de entornos productivos. En el presente trabajo se modela por primera vez, para el *flow shop* híbrido flexible, esa condición de los entornos reales.

LaTabla 1-2 muestra un resumen de los valores promedio del modelado experimental en los trabajos flow shop híbrido flexible en cuanto a casos modelados, número de trabajos, etapas y máquinas por etapa.

Tabla 1-2: Cantidades promedio y participación porcentual en el diseño de los casos de prueba en trabajos sobre configuración *flow shop* híbrido flexible

CASOS		TRABAJOS	
de 1 a 10	9%	1 a 20	59%
de 11 a 100	41%	55 a 70	32%
de 101 a 1000	41%	más de 70	9%
más de 1000	9%		
ETAPAS		MÁQUINAS POR ETAPA	
2 a 3	32%	1 a 2	23%
4 a 5	55%	3 a 4	50%
6 o más	14%	5 o más	27%

Se puede apreciar que la mayoría de investigadores modelaron casos relativamente pequeños. Sólo en la cantidad de casos para experimentación se puede apreciar un equilibrio entre los trabajos con menos de 100 casos modelados y los que modelaron de 101 en adelante. El trabajo con más casos de prueba tenía 3456 (Zandieh et al., 2010) mientras que se encontraron 2 trabajos con un solo caso de prueba ((F. Defersha, 2011; Solano Charris, 2009).

1.4 Conclusiones del capítulo

Aunque muchas empresas dicen producir tejidos técnicos en Colombia, sólo 6 cumplen con el perfil de desarrollar productos en los que prima la funcionalidad sobre la estética, tener integración vertical y trabajar en tejido plano.

La industria de tejidos técnicos se concentra en la zona Andina. Dado que su mercado se conforma por industrias de sectores como el automotor, el de blindajes y seguridad pasiva y el de bandas transportadoras, entre otros; tiende a concentrarse cerca a los centros urbanos más industrializados.

Aunque los expertos señalan el cumplimiento de entregas como la principal variable a optimizar en este subsector y como el segundo factor de competitividad después de la calidad; esa no es la principal condición que se tiene en cuenta al programar la producción, pues en ese punto se le da más prelación a los tiempos de procesamiento y al costo. El hecho de que se cumplan las entregas la mayoría o todas las veces puede incidir en que no se priorice como objetivo en la programación.

Las empresas le dan alta importancia a todas las condiciones de entorno real planteadas, pero privilegian que las máquinas paralelas sean no relacionadas y que los lotes de transferencia sean variables entre etapas como las más significativas. Como se muestra en la sección 1.3.2 (página 34) esas condiciones solo se encontraron en el 34% y el 7% de los trabajos revisados en la bibliografía, respectivamente, y cómo lo muestra la Tabla 7-2 (página 112) no se encontraron juntos en ningún artículo.

Es importante el uso de la hoja de cálculo Excel como herramienta de programación. Sin embargo, hay poca satisfacción en cuanto a su versatilidad y sus resultados. Es este un indicador de la necesidad de desarrollar soluciones acordes a la dinámica de la programación de producción de este tipo de empresas.

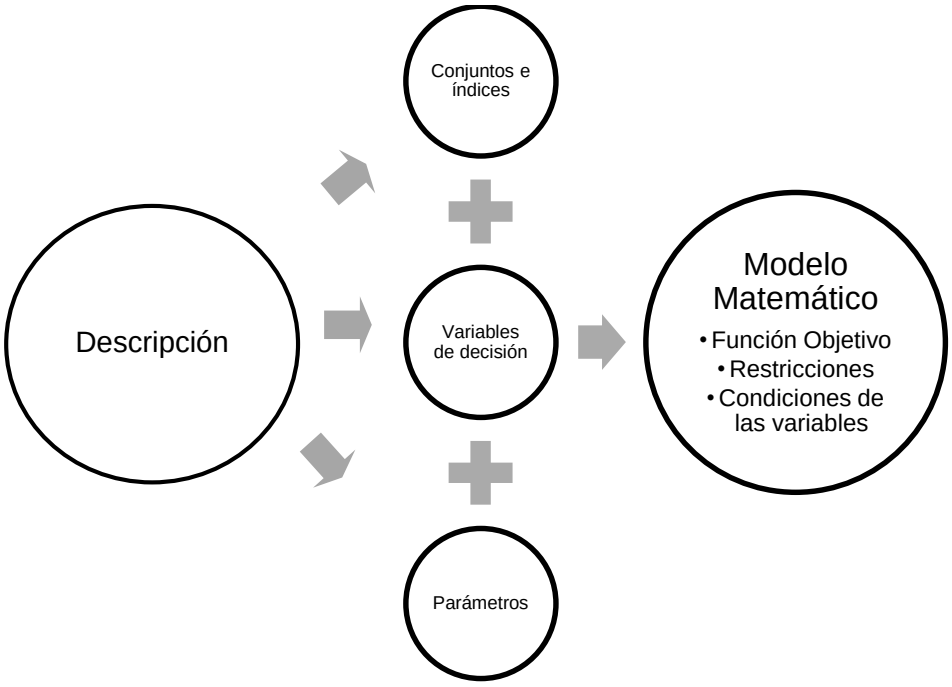
Existe abundante literatura científica alrededor del tema de programación en ambientes *flow shop* híbrido flexible y problemas conexos como el de máquinas paralelas en una etapa, el *flow shop* híbrido, el *flow shop* y la programación de una sola máquina. La mayor parte de esa literatura, no obstante, desarrolla modelos difícilmente aplicables a la producción real, dado que se ignoran o se minimiza la importancia de condiciones de los entornos reales, como el paralelismo entre máquinas no relacionadas, los tiempos de montaje dependientes de la secuencia, la maleabilidad, la entrada dinámica, la restricción de elegibilidad, el lote de transferencia variable entre etapas; y se trabaja más sobre datos simulados que sobre datos tomados de empresas reales.

La función objetivo más común en la literatura es minimizar el *makespan*. Aunque es una medida de desempeño bastante importante porque además guarda proporcionalidad con el costo y contribuye al cumplimiento de compromisos comerciales, el *makespan* no tiene en cuenta las fechas de entrega en el cálculo de la función objetivo. Las fechas de entrega fueron consideradas por los empresarios como la variable a optimizar y el segundo factor de competitividad, como se vio en la sección 1.1.2.1 (página 21).

Los algoritmos genéticos tienen alta utilización en la solución de este tipo de problemas debido a su bajo costo computacional y su potencia para encontrar soluciones de buena calidad en tiempos competitivos. Representan una alternativa viable en problemas que como el de la programación en ambientes *flow shop* híbrido flexible, son de tipo combinatorial.

2. Modelo matemático de la propuesta de solución

Figura 2-1: Esquema del capítulo



2.1 Descripción de la metodología

Se propone, a partir de los resultados del trabajo de campo y del estado del arte, modelar una propuesta de solución a un *Flow Shop* híbrido flexible correspondiente a una planta de producción con características similares a las que fabrican tejidos técnicos con integración vertical incluyendo proceso de tejeduría en el sistema de tejido plano y al menos otras dos etapas.

Todos los productos siguen la misma ruta por las diferentes etapas por lo que la configuración es un *flow shop*. Al haber paralelismo en al menos una etapa (generalmente es indispensable en la tejeduría), se convierte en un *flow shop* flexible. Y como algunos trabajos que pueden omitir alguna (la Preparación de Hilaza cuando ésta no requiere tratamiento, y los Acabados cuando la tela se despacha tal como sale del telar); es un *flow shop* híbrido flexible (Ver la definición en la sección 1.2.1.3, página 24).

Las máquinas paralelas son no relacionadas en todas las etapas donde hay paralelismo, lo que implica que el tiempo de procesamiento en cada máquina depende del trabajo y de la máquina (Vallada & Ruiz, 2011).

Hay restricción de elegibilidad: Cada trabajo solo puede procesarse un grupo de máquinas, y cada máquina está en capacidad de procesar algunos de los trabajos.

En todas las etapas, los tiempos de montaje dependen de la secuencia. Un cambio de referencia en cualquier etapa será más corto cuando el trabajo entrante es similar al saliente que cuando ambos son diferentes entre sí.

Hay maleabilidad en los tamaños de lote. Es posible subdividir un trabajo para, aprovechando el paralelismo, procesarlo simultáneamente en varias máquinas; o integrar varios trabajos para completar un lote más significativo y aportar a la eficiencia del proceso.

Los lotes de transferencia de un mismo trabajo, entre una etapa y la siguiente pueden tener tamaños diferentes haciendo necesario aprovechar la maleabilidad en la programación de los lotes. Tanto las subdivisiones como las integraciones deben ser coherentes con los tamaños de pieza o rollo previstos para la entrega del producto terminado.

Como se pudo apreciar en el numeral 1.1.2.1 (página 21), la industria de tejidos técnicos considera como el objetivo más importante a optimizar el cumplimiento de entregas. Por ese motivo se propone como función objetivo minimizar la tardanza media, calculada como el promedio de las diferencias entre las fechas de entrega reales y las prometidas para todos los trabajos que no puedan entregarse a tiempo.

El modelo matemático completo es el siguiente:

2.1.1Definición de conjuntos e índices

Se tiene un conjunto I de n trabajos que se denotan por el índice i. $i = 1, 2, \dots, n$

Hay un conjunto A de u productos. Cada uno de los n trabajos tiene asociado un producto perteneciente al conjunto de u productos. $a = producto_i$= a identifica al producto asociado al trabajo i.

Así mismo, cada uno de los n trabajos tiene asociada una cantidad Q_i correspondiente al pedido del cliente y una fecha de entrega d_i=Fecha de entrega prometida del trabajo i.

Cada uno de los u productos tiene asociado una unidad en la que se entrega el producto terminado al cliente (Ejemplo: longitud o peso de cada rollo). Se denotará como $Unidad_a$ = Unidad de producción asociada al producto a.

Los n trabajos se secuencian en un orden denotado por el índice k. $k = 1, 2, \dots, n$

El proceso tiene un conjunto L de s etapas denotadas por el índice l. $l = 1, 2, \dots, s$

En cada una de las s etapas, hay un subconjunto $J_L$de m_l máquinas paralelas que se denotan por el índice j_l. $j_l = 1, 2, \dots, m_l$.

La velocidad de trabajo de cada una de las m_l máquinas de la etapa l se denota por v_{jl}, y está dada en unidades (kilos, metros) por unidad de tiempo.

Las m_{li} máquinas de la etapa l que podrían procesar el producto i conforman el subconjunto J_{LI} y se denotan por el índice j_{li}. $j_{li} = 1, 2, \dots, m_{li}$; $1 \leq m_{il} \leq m_l$.

2.1.2 Definición de Variables

x_{ik}= Variable de decisión binaria. $x_{ik} = 1$, cuando el trabajo i se programa en el k-ésimo lugar de la secuencia y $x_{ik} = 0$ en cualquier otro caso.

y_{hijl}=Variable de decisión binaria. Asignación de máquinas. $y_{hijl} = 1$, cuando el lote h del producto i en la etapa l se asigna a la máquina j_l. $y_{hijl} = 0$, en cualquier otro caso.

Cada uno de los n trabajos en cada una de las s etapas puede subdividirse en un subconjunto H_{IL} diferente de n_{il} lotes (Ejemplo: urdimbres, rollos de tela) denotados por h_{il}. (lote h del producto i en la etapa l). $h_{il} = 1, 2, .., n_{il}$. $n_{il} \geq 1$

Cada uno de los n_{il} lotes tiene un tamaño de lote $Tamaño_{hil}$ asociado que puede ser diferente para cada uno. $Tamaño_{hil}$=Tamaño del lote h_{il} del producto i en la etapa l.

2.1.3 Definición de Parámetros

p_{hijl}= Tiempo de proceso del lote h_{il} del trabajo i en la máquina j_l de la etapa l. st_{abjl}=Tiempo de montaje del producto b cuando se procesa inmediatamente después del producto a en la máquina j_l de la etapa l. $a = producto_{k-1}, b = producto_k$ (producto que corresponde al trabajo programado en la secuencia k)

e_{ajl}= Parámetro para la eficiencia al procesar el producto a en la máquina j de la etapa l. $a = producto_i$ (producto asociado a trabajo i). $e_{ajl} \in [0,1]$

r_{hijl}= Fecha inicial de proceso del lote h_{il} del trabajo i en la máquina j_l de la etapa l.

C_{hijl}= Fecha final de proceso del lote h_{il} del trabajo i en la máquina j_l de la etapa l.

z_i= Número entero de unidades de venta contenidas en la cantidad asociada al trabajo i.

z_{hil}= Número entero de unidades de venta contenidas en la cantidad asociada al lote h_{il} del trabajo i en la etapa l.

2.1.4 Modelo matemático completo

$$Min\ Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{n} \tag{2-1}$$

$sujeto\ a\ las\ siguientes\ restricciones$:

$$T_i = máx\left[(máx(C_{hijs}) - d_i),0\right] \quad ; \forall i;\ \forall h_{il};\ \forall j_l;\ l = s \tag{2-2}$$

$$C_{hijl} = r_{hijl} + máx\left(\sum_{j=1}^{m_l}\sum_{h=1}^{n_{il}}\left(\frac{p_{hijl}}{e_{bjl}} + st_{abjl}\right)y_{hijl}\right)x_{ik};\ \forall i;\forall k;\forall l \tag{2-3}$$

$$p_{hijl} = \frac{tamaño_{hil}}{v_{jl}};\ \forall h_{il};\ \forall i;\ \forall j_l;\ \forall l \tag{2-4}$$

$$Unidad_a \times z_i = Q_i;\ \forall h_{ijl},;\ \forall i;\ \forall l;\ z_i \in Z^+(Enteros\ positivos) \tag{2-5}$$

$$tamaño_{hil} = Unidad_a \times z_{hil};\ \forall h_{il};\ \forall i;\ \forall l;\ z_{hil} \in Z^+;\ a = producto_i \tag{2-6}$$

$$\sum_{h_{il}=1}^{n_{il}} tamaño_{hil} = Q_i;\ \forall i;\ \forall l \tag{2-7}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ik} = 1;\ \forall k \tag{2-8}$$

$$\sum_{k=1}^{n} x_{ik} = 1;\ \forall i \tag{2-9}$$

$$\sum_{j_l=1}^{m_l} y_{hijl} = 1;\forall l;\ \forall i;\ \forall h_{il} \tag{2-10}$$

$$\sum_{h_{il}=1}^{n_{il}} y_{hijl} = n_{il}; \forall l;\ \forall i;\ \forall j_l \tag{2-11}$$

$$r_{hijl} \geq máx(C_{hij(l-1)})x_{ik}\ ; \forall l;\ \forall i;\ \forall k;\ \forall h_{il};\ \forall j_l \tag{2-12}$$

$$r_{hijl} \geq máx(C_{hijl}x_{i(k-1)})\ ; \forall l;\ \forall i;\ \forall k;\ \forall h_{il};\ \forall j_l \tag{2-13}$$

$$p_{hijl} = \infty\ ; si\ j_l \notin J_{LI} \tag{2-14}$$

$$p_{1ijl} = 0, h_{il}\ = n_l = \ 1;\ \forall j_l, si\ el\ trabajo\ i\ no\ pasa\ porla\ etapa\ l \tag{2-15}$$

$$x_{ik}, y_{hijl} = 0{,}1\ ; \forall l; \forall i;\ \forall k; \forall h_{il}; \forall j_l \tag{2-16}$$

La ecuación (2-1) es la función objetivo, minimizar tardanza media. La ecuación (2-2) representa la restricción que calcula la tardanza de cada trabajo como el máximo entre cero y la diferencia entre fecha prometida de entrega y fecha de entrega calculada como la fecha de finalización del trabajo en la última etapa. La ecuación (2-3) indica el cálculo de las fechas finales a partir de la fecha inicial, la eficiencia, el tiempo de procesamiento y el tiempo de montaje. La expresión (2-4) indica que el cálculo del tiempo de proceso se hace dividiendo el tamaño del pedido por la velocidad de la máquina. La expresión (2-5) indica que la unidad de venta debe ser un submúltiplo exacto de la cantidad pedida, mientras la expresión (2-6) asegura que el tamaño del lote es un múltiplo exacto de la unidad de venta del producto correspondiente al trabajo. La expresión (2-7) corresponde a que la suma de los tamaños de los lotes en los que se subdivide un trabajo es igual a la cantidad asociada a ese trabajo. La ecuación (2-8) es la restricción que indica que cada posición de secuencia corresponde a un solo trabajo, mientras la ecuación (2-9) restringe cada trabajo a estar en sólo una posición en la secuencia. La ecuación (2-10) asegura que cada lote de cada trabajo, sólo pueda ser programado en exactamente una máquina en cada etapa y la ecuación (2-11) indica que en cada etapa se deben programar exactamente el número de lotes en los que se haya desagregado cada trabajo bien sea en una sola máquina o en varias. La restricción mostrada en la expresión (2-12) indica que el momento de inicio de cada trabajo en cada etapa debe ser mayor o igual que la terminación del mismo trabajo en la etapa anterior. La ecuación (2-13) asegura que un trabajo no se pueda programar antes de que la máquina haya terminado el trabajo que se programó en la secuencia inmediatamente anterior. (2-14) indica que cada trabajo debe programarse en el subconjunto de máquinas elegibles para su proceso y de lo contrario su tiempo de procesamiento tiende a infinito. La expresión (2-15) muestra que si un trabajo salta una etapa su tiempo de proceso es cero y sólo es necesario un lote con ese tamaño. La expresión (2-16) indica que las variables de asignación y de secuenciación son binarias y sólo pueden tomar los valores de cero y uno.

Este modelo matemático, en primer lugar es compatible con el modelo del *flow shop* híbrido flexible modelando la pluralidad de etapas con igual secuencia (expresión (2-12)),

el paralelismo (expresiones (2-10) y (2-11)) y la posibilidad de saltar etapas (Expresión (2-15)).

En segundo lugar, el modelo tiene en cuenta las condiciones de entorno real que se están presentando juntas por primera vez en este trabajo: más de 2 etapas: definición del conjunto L de s etapas (ver página 47); Paralelismo entre máquinas no relacionadas (expresiones (2-10), y (2-11)); tiempos de montaje dependientes de la secuencia (expresión (2-3)); entrada dinámica que permite proactividad y reactividad en la programación (expresiones (2-3), (2-12) y (2-13)); lote de transferencia variable (expresiones (2-4), (2-5), (2-6) y (2-7)); maleabilidad (expresiones (2-5) y (2-7)); función objetivo basada en fecha de entrega (expresión (2-1)); restricción de elegibilidad (expresión (2-14)). La condición restante (Datos basados en entorno real) por sus características, se evidenciará en los resultados mostrados en el capítulo 4 (página 61).

En tercer lugar, el modelado es lo suficientemente amplio como para incluir otras configuraciones con menor complejidad, bien sea porque no consideren todas las condiciones de entorno real, o bien porque no tengan la posibilidad de saltar procesos del *flow shop* híbrido flexible, no tengan el paralelismo del *flow shop* híbrido, o no tengan la pluralidad de etapas del *flow shop*. Bastará con hacer iguales a cero las variables que no aplican o con indicar que el número de lotes, máquinas, o etapas es igual a uno, cuando el problema a resolver no implique pluralidad en alguno de esos elementos.

2.2 Conclusiones del Capítulo

Se presenta aquí el aporte propuesto en los objetivos de la investigación en cuanto al modelo matemático para la programación de la producción en un *flow shop* híbrido flexible como el de la industria de tejidos técnicos, teniendo en cuenta todas las condiciones de entorno real que se definieron en el numeral 1.2.2 (página 24).

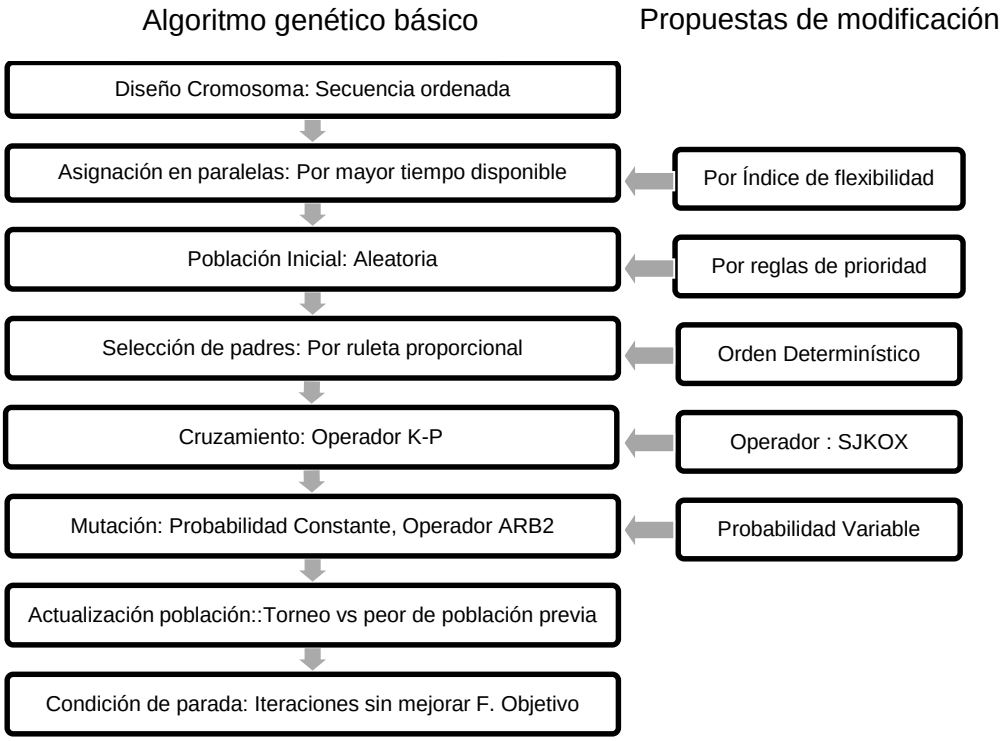
La función objetivo minimiza la tardanza media, manteniendo la consistencia con la selección del sondeo preliminar a un grupo cerrado de expertos vinculados a la industria de tejidos técnicos en Colombia, en cuanto a la importancia de las variables relacionadas con el cumplimiento de fechas de entrega. (Ver Tabla 1-1 (página 21))

Se modelaron las complejidades propias de los entornos reales de la producción de tejidos técnicos. Se consideró el paralelismo entre máquinas no relacionadas en todas las etapas con máquinas paralelas, priorizado como dificultad en la programación en los resultados del trabajo de campo. También se contemplaron los tiempos de montaje dependientes de la secuencia para todas las etapas. Se modeló la maleabilidad de los lotes en concordancia con lotes de transferencia variables y se consideró la entrada dinámica de trabajos que permite que la programación sea tanto proactiva como reactiva, y la restricción de elegibilidad. Con estas consideraciones se logra la aplicabilidad del modelo a la realidad de las empresas del sector objeto de este trabajo y se llega más

lejos que lo que se encontró en la literatura sobre *flow shop* híbrido flexible en cuanto al modelo matemático,

3. Algoritmos propuestos para la solución del modelo

Figura 3-1: Esquema del capítulo



Se propone una secuenciación inteligente mediante algoritmos genéticos. Se ha escogido este tipo de algoritmo por sus características de flexibilidad y adaptabilidad a una gran variedad de problemas. En los antecedentes mostrados en la Figura 1-5 (página 33) y en la Figura 1-9 (página 40) aparece como el más utilizado tanto en los problemas de entornos afines a la industria de tejidos técnicos como en los trabajos concretos con relación al *flow shop* híbrido flexible. Concretamente, los trabajos de (F. Defersha & Chen, 2012; Jabbarizadeh et al., 2009; Karimi et al., 2010; Sioud et al., 2013; Urlings et al., 2010; Zandieh & Hashemi, 2015; Zandieh & Karimi, 2010; Zandieh, Mozaffari, & Gholami, 2009) presentan algoritmos genéticos que tienen mejor

desempeño que otras técnicas en solución de problemas de secuenciación de ambientes *flow shop* híbrido flexible.

Se parte de una definición estándar del algoritmo con elementos comunes y se proponen modificaciones a elementos particulares de esa definición, buscando una mayor eficacia y una adaptabilidad a las características del problema a resolver.

3.1 Algoritmo genético básico

Se parte de un diseño de algoritmo genético general, similar al que se puede encontrar en múltiples trabajos sobre secuenciación en diferentes entornos productivos, y aplicable a un amplio número de problemas diferentes. A continuación se describe su funcionamiento:

3.1.1Diseño del cromosoma

De las ecuaciones (2-8) y (2-9), podemos notar que los n trabajos a secuenciar se deben programar en las n posiciones de la secuencia, de tal forma que cada trabajo sólo puede estar en una posición y, a su vez, cada posición sólo puede corresponder a un trabajo. El modelado binario de este conjunto de restricciones ocuparía n^2variables binarias, de las cuales, la gran mayoría ($n^2 - n$) tendrían el valor de cero, y sólo n tendrían el valor de uno. Se propone, en cambio, un modelado entero en el que se utilizarían n variables enteras que representarían cada una a uno de los trabajos de acuerdo su número de identificación. El valor de la variable representa la posición asignada a ese trabajo en la secuencia de procesamiento en la planta. Se construyen vs cromosomas en el que cada gen corresponde a un trabajo y el valor asignado es un número entero entre 1 y n, que representa la posición del trabajo respectivo en la secuencia para programar los trabajos en la planta.

Figura 3-2: Diseño del cromosoma. Ejemplo con 24 trabajos. A cada posición corresponde un trabajo.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Trabajo	8	9	14	3	11	21	15	4	10	7	13	16	23	20	6	17	22	2	1	5	18	24	12	19

3.1.2 Población inicial

Un generador de números aleatorios genera n valores siguiendo una distribución uniforme entre 0 y 1. Cada uno de los n valores generados corresponde en su orden de generación a uno de los trabajos a secuenciar y su posición relativa al ser ordenados de menor a mayor corresponde a la posición que tendrá cada trabajo en la secuencia de

programación de la producción. Este procedimiento se repite vs veces, siendo vs el tamaño de la población.

3.1.3 Asignación en etapas con máquinas paralelas

En coherencia con las restricciones modeladas en la ecuación (2-14), se asigna cada trabajo a la máquina elegible para procesarlo que tenga el mayor tiempo disponible (no comprometido con otros trabajos) al momento de hacer la asignación. Como se está modelando maleabilidad y lotes de transferencia variables, es posible fraccionar trabajos en lotes proporcionales al tamaño de la unidad de venta del producto, cumpliendo con las restricciones (2-5), (2-6) y (2-7). De esta manera, los diferentes lotes pueden ser procesados paralela y simultáneamente en varias máquinas de la misma etapa.

3.1.4 Cálculo de la función objetivo

Se calcula la tardanza media promediando el máximo entre cero y la diferencia entre la fecha final en el último proceso (Acabados) y la fecha prometida de entrega para cada trabajo. Para el cálculo se aplican las expresiones (2-2), (2-3) y (2-4), que parten de la información de los pedidos en cuanto a productos, cantidades y plazos y la relacionan con los datos de las máquinas y los productos, referentes a elegibilidad, eficiencia, velocidades de procesamiento y tiempos de montaje para llegar al cálculo de la fecha estimada final de cada trabajo, a la que se resta la fecha pactada para la entrega para calcular la tardanza.

3.1.5 Selección de Padres:

Tras ordenar la población ascendentemente según su tardanza media, se genera un valor de probabilidad igual a $\frac{1}{T_i}/\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{T_i}$, para cada trabajo. Igualmente se calcula la probabilidad acumulada ($\sum_{ii=1}^{i}\frac{1}{T_{ii}}/\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{T_i}$) hasta cada uno de los trabajos. Para el cruzamiento se generan números aleatorios entre 0 y 1 y se comparan con los valores de probabilidad acumulada. El primer trabajo cuya probabilidad acumulada sea mayor que el número aleatorio generado, será el elegido como primer padre. Para elegir el segundo padre se repite el procedimiento asegurando que no se repita el primer elegido.

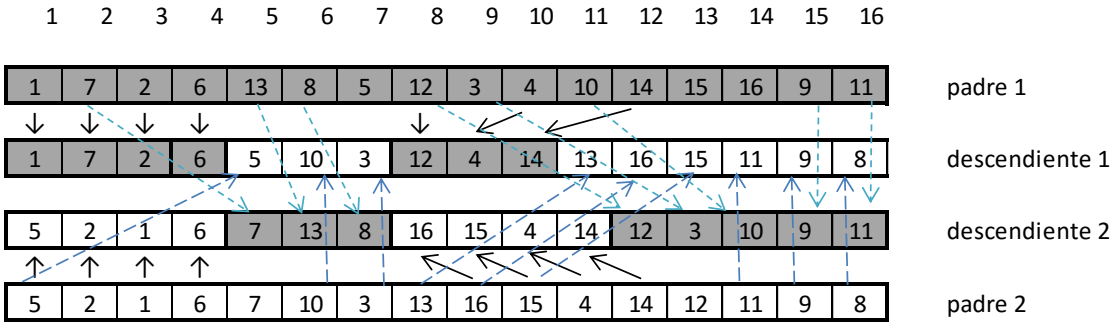
3.1.6 Cruzamiento:

Se aplica un operador de cruzamiento basado en los operadores 1-P y 2-P referenciados por (Murata & Ishibuchi, 1996), generalizándolo a pc puntos de cruce y a 2 descendientes, donde

$$pc = entero(\sqrt[2]{n}) \tag{3-1}$$

El operador propuesto (que podría llamarse K-P, siendo $K = pc$), ubica los genes en los cromosomas de los descendientes en el mismo orden relativo que tienen en cada padre, alternando los padres en cada punto de cruce. Si el valor del gen ya se encuentra en el cromosoma, pasa al gen siguiente hasta que llegue el punto de cruce respectivo. La Figura 3-3 muestra cómo funciona el operador de cruzamiento.

Figura 3-3: Esquema de funcionamiento del operador de cruzamiento K-P. Ejemplo para 16 trabajos con $\boldsymbol{K = 3}$ puntos de cruce.



3.1.7 Mutación

La mutación, en especial cuando los problemas son de gran tamaño y cuando se usa codificación entera, tiende a ser modelada con tasas relativamente altas (Gallego et al., 2006). En este caso, se propone una probabilidad de mutación constante, fijada entre 0,01 y 0,30. Se aplica el operador ARB2 (*Arbitrary two-jobs change mutation*) consistente en intercambiar los valores de dos posiciones dentro del descendiente seleccionadas aleatoriamente. (Murata & Ishibuchi, 1996). Este tipo de mutación es compatible con condiciones como tiempos de montaje dependientes de la secuencia y función objetivo de minimizar tardanza media, al mantener intactas secuencias parciales en sus ubicaciones originales. Dado que la mutación solo afecta a un par de genes del cromosoma, dependiendo del número de trabajos a secuenciar y de la probabilidad que se fije, la tasa efectiva de mutación estará entre $0{,}02/n$ y $0{,}60/n$.

3.1.8 Actualización de la población

Cada descendiente generado se compara en su valor de función objetivo con el último de los individuos de la población. Si el ganador es el nuevo descendiente y no existe en la

lista otro individuo igual, se ubica en la lista de acuerdo a su tardanza media. De lo contrario (si ya existe otro igual, o es peor que el último) se desecha.

3.1.9 Criterio de parada

Se repiten los pasos a partir del 3.1.5 (Selección de Padres:) hasta que pasen $vs \times (vs - 1)$ generaciones sin que cambie el mejor valor conocido para la tardanza media. $vs = tamaño\ de\ la\ población$.

3.2 Propuestas de modificaciones al algoritmo

Considerando las características del problema de secuenciación de trabajos en un *flow shop* híbrido flexible, así como las condiciones de entorno real modeladas en este trabajo, buscando una mayor eficacia del algoritmo, se proponen en total cinco modificaciones que transforman los procedimientos referentes a: la asignación en etapas con paralelismo; la generación de la población inicial; la selección de padres; el operador de cruce y la probabilidad de mutación; dejando el resto del algoritmo (diseño del cromosoma, cálculo de la función objetivo, operador de mutación, actualización de la población y criterio de parada); con mismo el funcionamiento presentado en la sección 3.1 (página 53)

Las modificaciones propuestas son las siguientes:

3.2.1 Asignación de máquinas en las etapas con paralelismo por Índice de Flexibilidad

Buscando una asignación de máquinas compatible con la restricción de elegibilidad, la maleabilidad y el lote de transferencia variable, se propone utilizar el índice de flexibilidad introducido en (Arango-marín et al., 2014) cuyo funcionamiento es el siguiente:

(i) Agrupar las máquinas de la etapa respectiva de acuerdo a su elegibilidad para los diferentes productos. Habrá un grupo de máquinas por cada subconjunto de productos para los que son elegibles. Una máquina puede pertenecer a varios grupos. Calcular el número de máquinas de cada grupo y a cuántos grupos distintos pertenece cada máquina.

(ii) Calcular el indicador de flexibilidad (IF) de cada máquina, como el resultado de dividir el número de grupos a los que pertenece cada máquina, sobre el mínimo número de máquinas por grupo entre todos los grupos en a los que pertenece. Ejemplo: Si la máquina A solo pertenece a un grupo de 6

máquinas y a uno de 3 máquinas; $IF_A = 2/\min(3;6) = 2/3 = 0{,}667$. Si la máquina B está en dos grupos de 4 máquinas y uno de 5 máquinas; $IF_B = 3/\min(4;4;5) = 3/4 = 0{,}75$.

(iii) Ordenar las máquinas en orden ascendente según su IF. En el ejemplo quedaría mejor ubicada la máquina A que la máquina b ($0{,}667 < 0{,}75$). Esta regla favorece los productos que tienen menos máquinas que puedan procesarlos, reservando esas máquinas para programarlas sólo cuando sea necesario. De igual forma, solo se asignan al final las máquinas con mayor flexibilidad, lo que facilita una programación más amplia sin esperas por una misma máquina.

(iv) Asignar el primer trabajo de la secuencia a la primera máquina elegible según su IF. La asignación corresponde al valor en unidades de venta del producto. Restar el valor asignado a la capacidad disponible de la máquina y a la cantidad por asignar del producto.

$$tamaño_{hil} = Unidad_a \times z_{hil};\ a = producto_i \tag{3-2}$$

$$z_{hil} = entero\left(\frac{\min(Cap_{jl}; Q_i)}{Unidad_a}\right); Cap_{jl} = Capacidad\ disponble\ máq\ j\ etapa\ l \tag{3-3}$$

(v) Si no se completa Q_i con una sola máquina, pasar a la siguiente máquina elegible. Si se completa Q_i, eliminar el trabajo de la lista y volver al paso (iv). Continuar hasta agotar la lista de trabajos.

3.2.2 Población inicial basada en reglas de prioridad

Para mejorar el desempeño del algoritmo partiendo de unas condiciones iniciales más favorables a soluciones de mejor calidad, se propone generar los vs vectores solución que conforman la primera población así: Los primeros 11, a partir de las siguientes reglas de prioridad:

1. CR (*Critical Ratio*) Razón Crítica = (Tiempo que falta para la fecha de entrega)/(Tiempo de procesamiento)
2. EDD (*Earliest Due Date*) Fecha de entrega más próxima
3. FCFS (*First Come First Served*) Primero en llegar, primero en ser atendido
4. JOHNSON (Regla de Johnson) Secuencia n trabajos que siguen la misma ruta de proceso en m etapas (Calculada con tiempos medios de proceso por etapa)
5. LCC A (*Least Changeover Cost*) Mínimo costo de montaje (aplicado para el tren de acabados)

6. LCC H(*Least Changeover Cos*t) Mínimo costo de montaje (aplicado para Preparación de Hilaza)
7. LCC UT (*Least Changeover Cost*) Mínimo costo de montaje (aplicado para Urdizaje y Tejeduría)
8. LCFS (*Last Come First Served*) Último en llegar, primero en ser atendido.
9. LPT (*Largest Process Time*) Máximo tiempo de procesamiento
10. LS (*Least Slack*) Mínima holgura = (Tiempo que falta para la fecha de entrega)-(Tiempo de procesamiento)
11. SPT (*Shortest Process Time*) Mínimo tiempo de procesamiento

Los restantes $vs - 11$ vectores solución son secuencias de trabajos sin ningún orden específico, generadas en forma aleatoria de manera similar a como se genera la población del algoritmo básico.

3.2.3 Selección de Padres determinística

Buscando asegurar que los mejores individuos se crucen inmediatamente entran a la población se propone una selección de padres en orden ascendente del valor de la función objetivo.

Tras ordenar la población ascendentemente según su tardanza media, se seleccionan los padres para el cruzamiento en forma secuencial y determinística empezando por el primero y el segundo, siguiendo con el cruce del primero con el tercero, y así hasta que el vector solución de menor tardanza media se haya cruzado con el resto de individuos de la población. El proceso continuará hasta cruzar entre sí todos los elementos de la población. Cuando se encuentre un descendiente mejor que el último de los individuos en la lista ordenada por tardanza media, se repetirán los cruces desde el punto que se le asigne en la lista de acuerdo a su función objetivo, incluyendo los cruces de ese individuo con los que están por encima de él en la lista. Si se encuentra un individuo mejor que el primero de la lista actual, se repiten los cruces desde el comienzo.

3.2.4 Cruzamiento con operador que conserva fragmentos de secuencias en iguales posiciones.

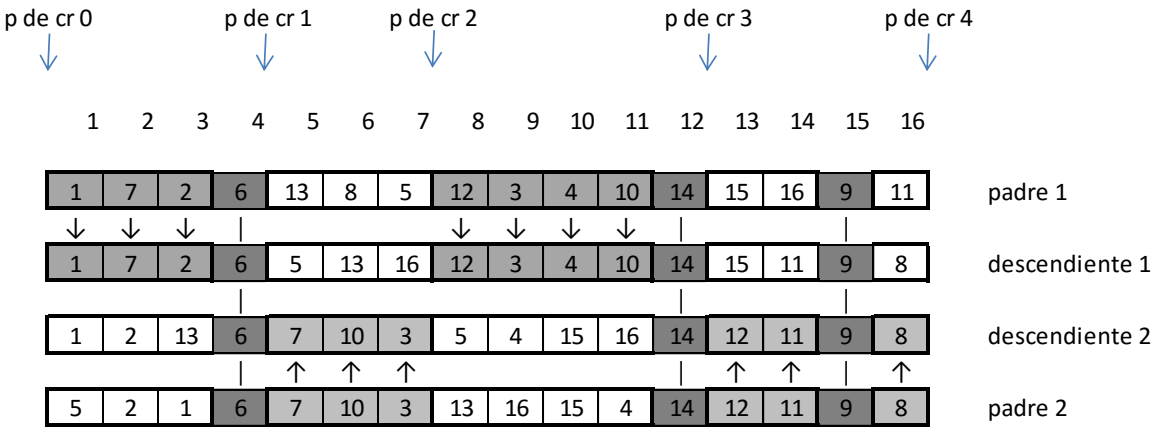
Se propone un operador de cruce basado en SJ2OX (Ruiz & Maroto, 2006). Ese operador mantiene intactas secuencias parciales que contribuyen a minimizar la tardanza y a minimizar los tiempos de cambio. Por lo tanto se considera apropiado en este caso donde se tienen tiempos de montaje dependientes de la secuencia. Como el problema estudiado tiene muchos trabajos a secuenciar, se propone usar pc puntos de cruce

calculando pc con la fórmula presentada en la ecuación (3-1). El operador, generalizado para pc puntos de cruce y adaptado para generar dos descendientes, se puede llamar SJKOX, haciendo $K = pc$.

Se calculan pc puntos de cruce aleatorios, llamados $cruce_1$, $cruce_2$, … hasta $cruce_{pc}$. En cada iteración se generan dos descendientes ($descendiente_1$ y $descendiente_2$) a partir de dos padres ($padre_1$ y $padre_2$).

En primer lugar se copian en ambos descendientes los trabajos con la misma ubicación en los dos padres, respetando sus posiciones originales. Después, se copian al $descendiente_1$, en las mismas posiciones de origen, los trabajos que aparecen en $padre_1$ desde la posición inicial hasta la posición $cruce_1 - 1$, y en todos los intervalos entre cada cruce par y el siguiente impar. El resto de trabajos se ubicarán $descendiente_1$, según el orden relativo que ocupan en $padre_2$. Para $descendiente_2$, se aplica un procedimiento análogo invirtiendo en la descripción anterior $padre_1$ y $padre_2$; $descendiente_1$ y $descendiente_2$; y par e impar.

Figura 3-4: Esquema de cruzamiento SJKOX. Ejemplo con 16 trabajos y $\boldsymbol{k = 3}$ puntos de cruce.



3.2.5 Probabilidad Variable de mutación

Se propone una probabilidad de mutación variable calculada con la expresión (3-4) que garantice la diversidad de la población cuando han pasado muchas iteraciones sin encontrar un mejor valor para la función objetivo, y que ayude a evitar convergencias prematuras del algoritmo, tras muchas generaciones con escasa o nula presencia de la mutación.

$$Probabilidad\ de\ mutación = \frac{Iteraciones\ desde\ último\ mejor}{vs \times (vs - 1)} \qquad (3\text{-}4)$$

La probabilidad de que haya mutación será cercana a cero recién se ha encontrado un mejor valor de tardanza media, mientras que después de muchas iteraciones sin mejorar se acercará a uno.

La mutación aplica el operador ARB2 (*Arbitrary two-jobs change mutation*) consistente en intercambiar los valores de dos posiciones dentro del descendiente seleccionadas aleatoriamente. (Murata & Ishibuchi, 1996).

3.3 Conclusiones del capítulo

Se logró plantear un algoritmo que soluciona en forma completa la secuenciación de trabajos en un *flow shop* híbrido flexible considerando las condiciones de entorno real y es consistente con la formulación del problema presentada en el capítulo 2 (página 45).

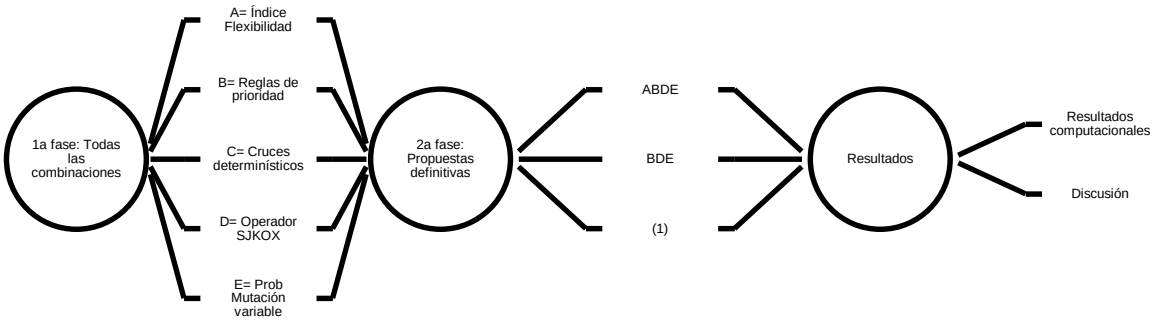
Se utilizó como técnica inteligente el algoritmo genético, probado en los antecedentes como un mecanismo eficaz para resolver este tipo de problemas, guardando consistencia con los hallazgos del estado del arte.

Se proponen un total de 5 modificaciones al algoritmo básico. Las modificaciones son procedimentales y van más allá de asignar valores a los parámetros del algoritmo. El efecto de cada modificación propuesta debe evaluarse tanto en forma particular como en combinación las otras modificaciones, siendo cada combinación de combinaciones una variante diferente del algoritmo genético. Tomando cada modificación en dos posibles niveles (presente o ausente) y combinándolas en un diseño experimental 2^5, se están proponiendo un total de $2^5 = 32$ variantes diferentes del algoritmo genético para el problema de reducir tardanza media en un *flow shop* híbrido flexible con tiempos de montaje dependientes de la secuencia, máquinas paralelas no relacionadas, entrada dinámica, elegibilidad, lote de transferencia variable, maleabilidad, 3 o más etapas y datos basados en entorno real.

Las modificaciones propuestas para los algoritmos genéticos están orientadas a encontrar una configuración acorde con las características del problema tratado. Los operadores de cruce y de mutación, las formas de calcular la población inicial y de seleccionar los padres, los criterios de parada, la selección de tasa de mutación, tamaño de población, límite de iteraciones, etc. fueron seleccionados de tal manera que permitieran un mejor desempeño del algoritmo y se acercaran más rápidamente a soluciones de buena calidad.

4. Resultados

Figura 4-1: Esquema del capítulo



Para evaluar la propuesta de solución desarrollada en los capítulos 2 y 3, se realizó un proceso de dos fases, la primera tendiente a validar la efectividad de cada una de las propuestas de modificaciones al algoritmo genético básico, presentadas en la sección 3.2 (página 56), con el fin de verificar su aporte a la consecución de mejores resultados. De allí sale un conjunto más reducido de configuraciones combinando las propuestas de modificación con mejores resultados.

En la segunda fase, se prueban las configuraciones resultantes de la primera fase, con un mayor número de réplicas por instancia de prueba y con una parametrización más eficiente de los algoritmos.

4.1 Diseño del conjunto de datos de prueba

Dado que en esta investigación se están modelando por vez primera en forma conjunta 9 condiciones de entorno real, siendo una de ellas precisamente el basarse en datos de una empresa real, no es posible hacer las pruebas con los conjuntos de datos con los que han trabajado otros investigadores.

El conjunto de datos más conocido sobre este tipo de problemas, usado inicialmente por (Ruiz et al., 2008) tiene como función objetivo minimizar *makespan* y por lo tanto no incluye datos sobre fechas de entrega, necesarios para calcular tardanza (función objetivo de la propuesta que aquí se presenta). Además no modela lotes de transferencia variables entre etapas ni maleabilidad, por lo que no incluye información sobre tamaños de lote o capacidades de las máquinas que permitan verificar esas situaciones en el modelo desarrollado en este trabajo. Ese set de datos, asimismo, supone los tiempos de montaje proporcionales a los tiempos de procesamiento, lo que no es aplicable en la industria de tejidos técnicos ni en muchas otras industrias que tienen la configuración *flow shop* híbrido flexible, donde los tiempos de montaje dependen de la secuencia pero no tienen relación con el tiempo de procesamiento del trabajo a montar.

El trabajo más completo encontrado en la literatura (F. Defersha, 2011) también minimiza *makespan* y, aunque modela maleabilidad, considera los tamaños de lote constantes entre etapas, a diferencia del presente trabajo que los considera variables. Por otra parte, en ese trabajo sólo se utilizó una instancia de prueba.

Por lo tanto, para el presente trabajo se diseñó un conjunto de datos de prueba basado en datos reales. Para diseñar las instancias de prueba, se parte del modelado de una planta de producción basada en una configuración común en plantas de tejidos técnicos: Se consideran 4 etapas básicas: Etapa 1 (Preparación de hilos): 5 máquinas, Etapa 2 (Urdizaje): 2 máquinas, Etapa 3 (Tejeduría): 20 máquinas y Etapa 4 (Acabados): 1 máquina. Como se busca un modelado más realista con integración vertical de más de 2 etapas en cada modelo de planta, de esa configuración se generan 4 modelos de planta de al menos 3 etapas cada una, incluyendo siempre la etapa 3 (tejeduría) en todos los modelos.

Tabla 4-1: Configuración de las plantas para la prueba de las variantes del algoritmo

Etapa / Planta	1	2	3	4
1	5 máquinas	2 máquinas	20 máquinas	
2	5 máquinas		20 máquinas	1 máquina
3		2 máquinas	20 máquinas	1 máquina
4	5 máquinas	2 máquinas	20 máquinas	1 máquina

Los datos detallados referentes a las máquinas se pueden consultar en el Anexo G (página 118). Se cuenta con una base de productos, cuyos datos relevantes se muestran en el Anexo H (página 119). La elegibilidad de máquinas para cada uno de los productos se configura en la tabla mostrada en el Anexo I (página 121)

Se tiene una base de 89 pedidos. Sobre esa base se montaron 6 casos de prueba representando diferentes situaciones en cuanto a plazos y cantidades según se muestra en la Tabla 4-2. Se asume como fecha inicial de programación el 31 de Octubre de 2014. Los datos de los pedidos y su inclusión en cada uno de los casos de prueba se muestra

en la tabla del Anexo J (página 123). La combinación de los 6 casos de prueba con las 4 configuraciones de planta mostradas en la Tabla 4-1 conforman un total de 24 instancias de prueba para las 32 variantes del algoritmo.

Tabla 4-2: Diseño de los casos de prueba

CASO	PLAZO	CANTIDAD	NÚMERO DE TRABAJOS
1	Todos	Todos	89
2	< 30 días	Todos	59
3	Entre 16 y 30 días	Todos	40
4	> 10 días	< 880 Kg	55
5	> 15 días	> 600 Kg	30
6	Aleatorio		24

Los tiempos de montaje dependen de la secuencia en todas las etapas del proceso. Se modelaron de acuerdo a los criterios mostrados en la Tabla 4-3 dónde para cada etapa se establece el tiempo en horas que requiere cada montaje cuando el producto a montar coincide con el anterior en una o más de sus características. Esas características están registradas en el código de la referencia: Los dos primeros caracteres indican el tipo de material, los caracteres 3º al 5º representan el calibre, la sexta posición reseña el tratamiento y los caracteres 7º al 9º muestran la cantidad de hilos (en decenas).

Tabla 4-3: Tiempos de montaje en horas según etapa y características compartidas entre producto previo y producto a montar

	CARACTERÍSTICAS COMPARTIDAS CON PRODUCTO PREVIO						
ETAPA	NINGUNA	SÓLO CALIBRE	SÓLO NÚMERO DE HILOS	SÓLO TRATAMIENTO	SÓLO MATERIAL Y CALIBRE	SÓLO NÚMERO DE HILOS Y TRATAMIENTO	NÚMERO DE HILOS, TRATAMIENTO, MATERIAL Y CALIBRE
1	2	1	2	2	0	2	0
2	3	3	2	3	3	1	0
3	6	6	3	6	6	2	1
4	0,5	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2	0

La Tabla 4-4 resume las características del set de datos diseñado para las pruebas de las variantes del algoritmo.

Tabla 4-4: Resumen diseño del conjunto de datos de prueba

Factor	Símbolo	Número de niveles	Valores
Trabajos	n	6	89, 59, 40, 55, 30, 24
Etapas	s	2	3,4
Máquinas paralelas no relacionadas por etapa	m_l	4	5, 2, 20,1

Factor	Símbolo	Número de niveles	Valores
Fechas iniciales	r_i	5	0,1,3,4 y 6 días tras programación
Porcentaje de productos que saltan etapa			21%=11% (etapa 1) + 10% (etapa 4)
Porcentaje de máquinas elegibles por producto en promedio en cada etapa con paralelismo		3	Etapa 1 = 65%, etapa 2 = 100%, etapa 3 = 51%

4.2 Primera fase: Prueba de las propuestas de modificación

La prueba de las 32 variantes del algoritmo (considerando las combinaciones de los 2 niveles para cada una de las modificaciones) con las 24 instancias (6 casos en 4 plantas) implica 768 combinaciones. De cada combinación se corrieron 3 réplicas, para un total de 2304 observaciones. Para el procesamiento de la información se utilizó el procedimiento para un diseño factorial 2^k descrito en (Montgomery, 2004), extendiéndolo al caso de 5 factores en dos niveles.

4.2.1 Diseño experimental primera fase

Para probar el efecto individual de cada una de las 5 modificaciones descritas en la sección 3.2 (página 56), se desarrolla un diseño experimental 2^5, que combina cada uno de los 5 elementos del algoritmo genético en los que se proponen las modificaciones en dos niveles:

- Bajo = diseño básico (modificación ausente) descrito en la sección 3.1 (página 53)
- Alto = diseño modificado (modificación presente) descrito en la sección 3.2 (página 56).

Los factores se modelan según la siguiente codificación:

A = Asignación de máquinas en las etapas con paralelismo por Índice de Flexibilidad

B = Población inicial basada en reglas de prioridad

C = Selección de Padres determinística

D = Cruzamiento con operador SJKOX

E = Probabilidad Variable de mutación

La Tabla 4-5 resume la configuración de las variantes del algoritmo probadas con respecto a la inclusión de las propuestas de modificación al algoritmo genético básico.

Tabla 4-5: Configuración de las variantes del algoritmo genético para las pruebas de la primera fase. Factores = propuestas de modificación al genético básico.

FACTOR	A	B	C	D	E
Descripción Código	Asignación por índice de Flexibilidad	Población inicial basada en reglas de prioridad	Selección de padres determinística	Cruzamiento con operador SJKOX	Probabilidad variable de mutación
(1)	NO	NO	NO	NO	NO
a	SÍ	NO	NO	NO	NO
ab	SÍ	SÍ	NO	NO	NO
abc	SÍ	SÍ	SÍ	NO	NO
abcd	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	NO
abcde	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
abce	SÍ	SÍ	SÍ	NO	SÍ
abd	SÍ	SÍ	NO	SÍ	NO
abde	SÍ	SÍ	NO	SÍ	SÍ
abe	SÍ	SÍ	NO	NO	SÍ
ac	SÍ	NO	SÍ	NO	NO
acd	SÍ	NO	SÍ	SÍ	NO
acde	SÍ	NO	SÍ	SÍ	SÍ
ace	SÍ	NO	SÍ	NO	SÍ
ad	SÍ	NO	NO	SÍ	NO
ade	SÍ	NO	NO	SÍ	SÍ
ae	SÍ	NO	NO	NO	SÍ
b	NO	SÍ	NO	NO	NO
bc	NO	SÍ	SÍ	NO	NO
bcd	NO	SÍ	SÍ	SÍ	NO
bcde	NO	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
bce	NO	SÍ	SÍ	NO	SÍ
bd	NO	SÍ	NO	SÍ	NO
bde	NO	SÍ	NO	SÍ	SÍ
be	NO	SÍ	NO	NO	SÍ
c	NO	NO	SÍ	NO	NO
cd	NO	NO	SÍ	SÍ	NO
cde	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ
ce	NO	NO	SÍ	NO	SÍ
d	NO	NO	NO	SÍ	NO
de	NO	NO	NO	SÍ	SÍ
e	NO	NO	NO	NO	SÍ

4.2.2 Parámetros de las variantes del algoritmo en la primera fase

Para que las variantes del algoritmo sólo se diferenciaran en las combinaciones de las modificaciones propuestas, se mantuvieron los parámetros de acuerdo a la formulación presentada en el capítulo 3 (página 52). En los casos en los que los parámetros se

calculan con fórmulas basadas en valores de los casos de prueba se modelaron de acuerdo a esas fórmulas. En los otros casos, se mantuvieron constantes. La Tabla 4-6 presenta el resumen de la parametrización utilizada en las 32 variantes del algoritmo.

Tabla 4-6: Parámetros de operación de las variantes del algoritmo genético para las pruebas de la primera fase.

Parámetro	Fórmula	Caso de prueba					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Longitud del cromosoma	n	89	59	40	55	30	24
Tamaño de la población	vs	12	12	12	12	12	12
Puntos de cruce	$entero(raiz(n))$	9	7	6	7	5	4
Probabilidad de mutación por iteración (factor E ausente)	$P(mut)$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Probabilidad de mutación por iteración (factor E presente) $iteraciones\ sin\ mejorar/(vs*(vs-1))$	desde	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076	0,0076
	hasta	1	1	1	1	1	1
Tasa efectiva de mutación (factor E ausente)	$P(mut)*2/n$	0,0067	0,0102	0,0150	0,0109	0,0200	0,0250
Tasa efectiva de mutación (factor E presente) $P(mut)*2/n$	desde	0,0002	0,0003	0,0004	0,0003	0,0005	0,0006
	hasta	0,0225	0,0339	0,0500	0,0364	0,0667	0,0833
Criterio de parada = iteraciones sin mejora	$vs*(vs-1)$	132	132	132	132	132	132

4.2.3 Resultados computacionales primera fase

Todos los experimentos se efectuaron en el mismo computador: Procesador Intel Core i3-3217U CPU a 1.80 GHz con 4 GB de memoria RAM, sistema operativo Windows 10.0 versión 1511. La implementación de todas las variantes del algoritmo se desarrolló en Microsoft Visual Fox Pro 9 SP 2.

Los resultados se clasificaron de acuerdo a las variantes del algoritmo y a las instancias de prueba. Se aplicó análisis de varianza para el diseño factorial 2^5, con $\alpha = 0{,}05$. Para el cálculo de los contrastes se utiliza el desarrollo de Ecuación (4-1), adaptada de (Montgomery, 2004).

$$Contraste_{A..E} = (a \pm 1)(b \pm 1)(c \pm 1)(d \pm 1)(e \pm 1) \quad (4\text{-}1)$$

Donde $Contraste_{A..E}$ es el contraste para calcular el efecto del factor $A \ldots E$ que puede ser cualquiera de los 5 factores individuales, o cualquiera de las 27 combinaciones de éstos entre sí. En los casos en los que el factor está presente en el tratamiento la operación correspondiente es una resta, mientras que cuando el factor está ausente, la operación es una suma. Al desarrollar la expresión, el término igual al número 1 se reemplazará por el tratamiento que tiene todos los factores ausentes, codificado por convención como (1). Por ejemplo la ecuación (4-2) desarrolla el contraste correspondiente al efecto individual del factor A (Asignación por índice de flexibilidad). Como A está presente, su operación es una resta $(a-1)$, mientras que para los otros factores, que no están presentes, las operaciones son sumas.

$$\begin{aligned} Contraste_A &= (a-1)(b+1)(c+1)(d+1)(e+1) \\ &= a + ab + ac + ad + ae + abc + abd + abe + acd + ace + abcd \\ &+ abce + abcde - b - c - d - e - bc - bd - be - cd - ce - de \\ &- bcd - bce - cde - bcde - (1) \end{aligned} \quad (4\text{-}2)$$

y la ecuación (4-3) calcula el contraste para el efecto de la interacción de los factores B, C, D y E, cuando éstos están presentes y sólo el factor A está ausente.

$$\begin{aligned} Contraste_{BCDE} &= (a+1)(b-1)(c-1)(d-1)(e-1) \\ &= a - ab - ac - ad - ae + abc + abd + abe + acd + ace - abcd \\ &- abce + abcde - b - c - d - e + bc + bd + be + cd + ce + de \\ &- bcd - bce - cde + bcde + (1) \end{aligned} \quad (4\text{-}3)$$

En general, los signos que tendrán las sumas de los resultados de tardanza media con cada uno de los tratamientos se resumen en la Tabla 4-7,

Tabla 4-7: Signos para cada suma de resultados de combinación de tratamientos en el cálculo de los contrastes para determinar los efectos de cada factor y sus combinaciones. Adaptada para $k = 5$ de (Montgomery, 2004).

Combinación Trata-mientos	EFECTO FACTORIAL																															
	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	E	AE	BE	ABE	CE	ACE	BCE	ABCE	DE	ADE	BDE	ABDE	CDE	ACDE	BCDE	ABCDE
(1)	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-
a	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
c	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-
bc	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
d	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+
ad	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-
bd	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-
abd	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
cd	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
acd	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
bcd	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
abcd	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
e	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+
ae	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-
be	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-
abe	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
ce	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-
ace	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+
bce	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
abce	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
de	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-
ade	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
bde	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+

Combinación Trata-mientos	EFECTO FACTORIAL																															
	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	E	AE	BE	ABE	CE	ACE	BCE	ABCE	DE	ADE	BDE	ABDE	CDE	ACDE	BCDE	ABCDE
abde	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
cde	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+
acde	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
bcde	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
abcde	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

El efecto de cada factor (sea individual o interacción de factores individuales), se calcula con la ecuación (4-4) donde se tiene en cuenta que se hicieron 3 réplicas de cada experimento con los 5 factores.

$$Efecto_{A\ldots E} = \frac{2 \times Contraste_{A\ldots E}}{3 \times 2^5} = \frac{Contraste_{A\ldots E}}{48} \tag{4-4}$$

Y las sumas de cuadrados se calculan con la ecuación(4-5).

$$Suma\ de\ Cuadrados_{A\ldots E} = \frac{(Contraste_{A\ldots E})^2}{3 \times 2^5} = \frac{(Contraste_{A\ldots E})^2}{96} \tag{4-5}$$

El Anexo K (página 126) muestra en detalle los resultados de las estimaciones de los efectos de los factores y suma de cuadrados, para los resultados de cada una de las 24 instancias de prueba frente a la combinación de los 5 factores correspondientes a las modificaciones propuestas al algoritmo. Como la función objetivo es minimizar tardanza, se considera favorable el efecto de un factor cuando su contraste es un resultado negativo y la prueba F indica que si hay diferencia significativa en ese factor. En el caso en el que la prueba F indica diferencia significativa para un factor cuyo contraste tiene un valor positivo, su efecto se considera desfavorable. En los casos en los que la prueba F no encontró que la diferencia fuera significativa, el efecto no se tuvo en cuenta. La Tabla 4-8 resume los efectos significativos favorables (F) y desfavorables (D) de cada uno de los factores y de las interacciones entre estos.

Tabla 4-8: Resumen análisis de varianza. Efectos significativos de los factores en cada una de las instancias de prueba. F= Favorable, D=Desfavorable

CASO	CASO 1 89				CASO 2 59				CASO 3 40				CASO 4 55				CASO 5 30				CASO 6 24					
PLANTA	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	FAVORABLE	DESFAVORABLE
A	F	F	F	F	F	F		F	F	F	D	F	F	F	D	D	F	F	F	F	F	D	D	D	17	6
B	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F		F	F	F	F	F	F	F	23	0
C	D	D	D	D	D	D	D		D	D	D	D	D	D	D	D		D	D	D	D	D		D	0	21
D			F													F				D					2	1
E			F											F											2	0
AB	D	D				D			D		F		D									F	F		3	5
AC																F				F					2	0
AD											D							D							0	2
AE							F			D		D				D								F	2	3
BC		F	F							F											F	F			5	0

CASO	CASO 1 89				CASO 2 59				CASO 3 40				CASO 4 55				CASO 5 30				CASO 6 24					
PLANTA	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	FAVORABLE	DESFAVORABLE
BD	D		D				D					D				D		F							1	5
BE														D											0	1
CD	D	D	D	D		D	D	D		D	D	D	D	D	D	D		D	D	D		D			0	18
CE	D	D	D	D	D				D	D		D		D		D					D				0	11
DE												D				D									0	2
ABC																						F			1	0
ABD												F		F		F						F			4	0
ABE							D			F						F					F				3	1
ACD						F	F	F		F			F	F						F		D			7	1
ACE														F										F	2	0
ADE						D								F							F				2	1
BCD				D		F				F				F											3	1
BCE												F													1	0
BDE							D					F							F						2	1
CDE							D				D								D						0	3
ABCD							D									F						F			2	1
ABCE														D											0	1
ABDE																D					D	D		F	1	3
ACDE																								D	0	1
BCDE							F							D		F									2	1
ABCDE													D		D			F	D		D			F	2	4

4.2.4 Discusión de resultados de la primera etapa

Se observa que el factor B (población generada a partir de reglas de prioridad) tuvo un efecto favorable en la casi totalidad de las instancias de prueba, mientras el factor C (selección de padres determinística) tuvo efecto desfavorable en 21 de las 24 instancias y no tuvo efecto favorable en ninguna. Se puede concluir, por lo tanto que es conveniente que la población se genere a partir de reglas de prioridad clásicas y que no es conveniente seleccionar los padres para el cruzamiento en forma determinística.

En los otros factores tomados en forma individual, el factor A (asignación por índice de flexibilidad) genera un resultado diferente según la instancia a la que se aplique. Su efecto fue favorable en 17 de las instancias, incluyendo todas las de la planta 1 (con elegibilidad en la primera y última etapas, ésta última con 20 máquinas), mientras que presentó efecto desfavorable en 6 de las instancias incluyendo 3 que corresponden a la planta 3 (con elegibilidad sólo en la etapa intermedia) y 3 de las 4 instancias del caso 6 (el de menor tamaño, con sólo 24 trabajos seleccionados en forma aleatoria).

El factor D (cruzamiento SJKOX) apareció reportado 2 veces con efecto favorable y una sola vez con efecto desfavorable, mientras el factor E (probabilidad de mutación variable) sólo se reportó dos veces con efecto favorable y ninguna vez como desfavorable.

Las interacciones entre factores presentan, en general, diferentes efectos: a veces favorables y otras desfavorables, a excepción de las interacciones CD y CE con 18 y 11 apariciones respectivamente con efecto desfavorable, confirmando lo dicho atrás con respecto al factor C. Es notable también que la interacción BD aparezca 5 veces con efecto desfavorable y 1 vez con efecto favorable, pero la interacción ABD aparece 4 veces con efecto favorable (en dos de las 4 coincide con las instancias en las que BD tiene efecto desfavorable). Al parecer la interacción entre la población a partir de reglas de prioridad y el cruzamiento SJKOX no es favorable por si sola en algunos casos, pero si se combina con la asignación por índice de flexibilidad, su efecto pasa a ser favorable.

Sobresale también que, pese al efecto desfavorable del factor C, la interacción BC tenga 5 apariciones con efecto favorable y la interacción ACD, tenga 7 veces efecto favorable y 1 vez efecto desfavorable, lo que indica que la magnitud del efecto de los factores A y D, con efecto más favorable que desfavorable, predomina sobre la magnitud del posible efecto desfavorable que implica la presencia del factor C. El resto de las interacciones tiene 3 o menos incidencias significativas reportadas en uno u otro sentido, lo que no permite conclusiones determinantes.

A partir de este resultado, se encuentra que no hay una variante del algoritmo que pueda considerarse como la única y exclusiva para resolver todos los casos. Por el contrario, y coincidiendo con varios trabajos de la literatura, se encuentra que los algoritmos que ofrecen las mejores soluciones son diferentes de acuerdo a las características del problema.

4.3 Segunda fase: Prueba de las propuestas definitivas

Con la misma base de casos de prueba conformada por las combinaciones de 6 casos de listas de trabajos con 4 configuraciones de plantas de producción, se someten a prueba las propuestas que se derivan del análisis de los resultados de la primera fase. A continuación se muestra el diseño de las variantes del algoritmo, la configuración de las pruebas para verificar su eficacia y los resultados obtenidos en su prueba computacional.

4.3.1 Diseño de las variantes del algoritmo para las propuestas definitivas

Los resultados de la primera fase muestran que el factor C (selección determinística de padres) debe excluirse, por su marcado efecto desfavorable en la búsqueda de buenas soluciones, mientras el factor B (población inicial basada en reglas de prioridad) es recomendado que se incluya para mejorar el desempeño del algoritmo. El factor D y el factor E tienen un efecto más favorable que desfavorable y se pueden incluir sin afectar el rendimiento general del algoritmo. El factor A es el más difícil porque tiene efecto muy

favorable en un buen número de instancias y muy desfavorable también en un buen número de instancias de prueba, marcadamente relacionados con una configuración de planta y un caso específico de trabajos a programar. Se propone, por lo tanto, probar en mayor escala dos variantes del algoritmo, ambas con los factores B, D y E, pero la primera incluyendo al factor A y la segunda excluyéndolo. Para efectos de comparación, se probará también una variante básica del algoritmo que no incluye ningún factor de las propuestas de modificación, es decir, tiene los 5 factores en nivel bajo y es equivalente al tratamiento codificado como (1).

La experimentación se hace sobre las mismas 24 instancias de prueba. Para una mejor observación del desempeño de las variantes del algoritmo, se corren 10 réplicas de cada una de las 3 variantes en cada una de las instancias.

En los resultados del trabajo presentado en (Arango Marín, Giraldo García, & Castrillón-gómez, 2015) en el que se probó una variante del algoritmo genético equivalente a la combinación de los factores A, B, C, D y E y otra variante básica del algoritmo, sobre 5 de estos mismos 6 casos, con la misma configuración de planta 4, para poblaciones de 20, 22 y 25 individuos, se concluyó que en la mayoría de los casos el tamaño de la población no incidía en la diferencia en los resultados. Por este antecedente, se modela la prueba con un tamaño de población $vs = 20$.

En concordancia con la primera fase, las variantes del algoritmo se denominarán: ABDE, BDE y (1) La Tabla 4-9 resume la configuración de las variantes del algoritmo, con respecto a la inclusión de las propuestas de modificación al algoritmo genético básico.

Tabla 4-9: Configuración de las variantes propuestas de algoritmos genéticos

FACTOR	A	B	C	D	E
Descripción Código	Asignación por índice de Flexibilidad	Población inicial basada en reglas de prioridad	Selección de padres determinística	Cruzamiento con operador SJKOX	Probabilidad variable de mutación
(1)	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
Abde	VERDADERO	VERDADERO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO
Bde	FALSO	VERDADERO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO

4.3.2 Parámetros de las variantes del algoritmo de las propuestas definitivas

La Tabla 4-10 presenta el resumen de la parametrización utilizada en las 3 variantes del algoritmo para la prueba de las propuestas definitivas.

Tabla 4-10: Parametrización variantes propuestas del algoritmo (ABDE, BDE y (1))

		Caso de prueba					
Parámetro	**Fórmula**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Longitud del cromosoma	n	89	59	40	55	30	24

Parámetro	Fórmula	Caso de prueba					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Tamaño de la población	vs	20	20	20	20	20	20
Puntos de cruce	$entero(raiz(n))$	9	7	6	7	5	4
Probabilidad de mutación por iteración variante (1)	$P(mut)$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Probabilidad de mutación por iteración ABDE y BDE $iteraciones\ sin\ mejorar/(vs*(vs-1))$	desde	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
	hasta	1	1	1	1	1	1
Tasa efectiva de mutación variante (1)	$P(mut)*2/n$	0,0067	0,0102	0,0150	0,0109	0,0200	0,0250
Tasa efectiva de mutación ABDE y BDE $P(mut)*2/n$	desde	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
	hasta	0,0225	0,0339	0,0500	0,0364	0,0667	0,0833
Criterio de parada = iteraciones sin mejora	$vs*(vs-1)$	380	380	380	380	380	380

4.3.3 Resultados computacionales de las propuestas definitivas

Nuevamente, todos los experimentos se efectuaron en el mismo computador: Procesador Intel Core i3-3217U CPU a 1.80 GHz con 4 GB de memoria RAM, sistema operativo Windows 10.0 versión 1511; y la implementación de las tres variantes del algoritmo se desarrolló en Microsoft Visual Fox Pro 9 SP 2.

La Tabla 4-11 muestra los resultados promedio de la función objetivo (tardanza media) con cada uno de las tres variantes probadas del algoritmo, así como los mejores resultados obtenidos con reglas de prioridad básicas. Se reportan por separado las reglas de prioridad aplicadas con cada una de las opciones de asignación dada la incidencia de esas opciones en el cálculo de la función objetivo.

Tabla 4-11: Comparativo Tardanza media, Variantes propuestas del algoritmo genético y mejores resultados por reglas de prioridad. Resaltado el mejor resultado para cada instancia de prueba

		VARIANTES			ASIGNA INDICE FLEXIBILIDAD					ASIGNA MAYOR TIEMPO DISP				
CASO	PLANTA	ABDE	BDE	(1)	SPT	EDD	JOHN	LS	LCCH	SPT	JOHN	EDD	RAND	LCCA
1	1	**2,67**	9,55	13,13	8,25	10,14	8,76	13,34	11,86	17,24	16,67	24,07	24,47	27,81
1	2	**7,30**	10,30	12,50	13,46	15,98	13,21	21,36	21,05	18,02	18,86	26,82	28,06	30,76
1	3	**6,80**	11,79	13,58	11,94	14,51	13,38	17,24	16,41	16,51	18,18	21,15	25,50	25,58
1	4	**8,92**	12,79	18,27	13,59	17,80	29,44	23,84	22,27	21,12	20,40	31,08	34,17	38,29
2	1	**4,12**	9,98	9,35	8,28	10,04	8,14	10,32	10,44	14,94	14,72	19,46	22,69	23,27
2	2	**8,26**	9,92	11,65	13,20	16,99	13,07	18,81	17,00	15,93	16,63	26,73	25,16	28,60
2	3	**7,85**	9,42	12,04	13,10	16,24	13,03	17,53	16,99	14,80	16,34	20,47	22,07	19,63
2	4	**9,36**	13,27	14,10	13,78	18,15	22,55	22,23	19,71	17,57	18,34	28,50	25,56	30,06
3	1	**1,48**	3,92	4,76	4,95	4,31	4,94	6,44	4,41	8,64	7,79	10,40	14,61	13,13
3	2	**2,79**	4,21	4,08	8,00	8,94	7,44	12,61	9,86	8,42	9,41	18,04	16,31	15,51
3	3	**2,43**	3,23	4,13	7,70	7,74	7,42	10,79	9,48	7,38	8,66	12,26	12,82	11,31
3	4	**3,28**	4,68	6,11	8,35	10,65	15,52	14,02	10,79	9,08	10,07	18,52	20,26	17,29
4	1	0,11	**0,09**	1,18	2,26	1,29	1,23	1,11	2,91	3,84	3,37	2,24	5,02	5,57

CASO	PLANTA	VARIANTES			ASIGNA INDICE FLEXIBILIDAD					ASIGNA MAYOR TIEMPO DISP				
		ABDE	BDE	(1)	SPT	EDD	JOHN	LS	LCCH	SPT	JOHN	EDD	RAND	LCCA
4	2	**0,76**	1,10	2,14	5,24	4,51	5,55	3,98	7,09	6,92	6,77	7,07	9,23	12,25
4	3	1,24	**0,91**	1,18	5,12	4,29	5,73	4,72	7,03	5,60	6,85	6,22	9,09	11,75
4	4	**0,91**	0,95	2,31	5,27	4,77	8,96	4,53	7,65	7,35	6,93	7,54	11,68	12,49
5	1	**1,54**	5,92	6,25	4,90	4,72	5,78	6,95	10,41	12,53	12,09	12,59	22,78	17,05
5	2	**2,31**	4,13	5,46	9,56	7,21	8,27	11,86	19,55	15,56	13,69	15,01	24,14	19,16
5	3	**2,38**	4,08	4,97	11,28	5,75	10,34	6,24	18,53	12,48	12,92	9,14	21,14	16,79
5	4	**3,81**	7,51	9,27	10,26	9,89	19,36	13,13	21,11	16,68	15,26	17,99	23,83	23,38
6	1	**0,23**	0,38	0,88	3,38	1,49	2,32	3,04	3,39	4,49	4,01	1,71	6,36	5,66
6	2	0,63	**0,20**	0,85	5,61	3,33	3,59	7,72	5,97	4,39	4,27	3,11	8,02	11,75
6	3	0,46	**0,01**	0,04	4,96	2,77	4,47	6,68	5,93	4,20	4,18	0,56	8,99	11,57
6	4	0,95	**0,34**	0,95	6,12	3,99	10,49	8,60	7,23	4,85	4,90	3,99	10,18	11,98

En los resultados de la Tabla 4-11, aparte de la eficiencia de las variantes ABDE y BDE, con los que se obtienen los mejores resultados, se observan grandes diferencias en los valores óptimos entre las diferentes instancias de prueba, probablemente derivados de las diferencias en la complejidad entre las instancias. Para neutralizar el efecto de esas diferencias, se requiere usar otros indicadores.

Con el fin de permitir un análisis de la eficacia de las variantes del algoritmo, en una escala independiente de las magnitudes de los resultados, que facilite la comparación entre las diferentes instancias, así como frente a resultados de otros investigadores, se implementaron tres indicadores relativos tomados de la literatura científica sobre secuenciación. El primero de ellos es el RPD (*Relative percentage deviation*) introducido como PRD en (Ruiz & Allahverdi, 2007) y conocido como RPD a partir de (Naderi, Zandieh, & Roshanaei, 2009). La fórmula de cálculo de este indicador para el caso de minimizar tardanza, está indicada en la ecuación (4-6)

$$RPD = \frac{T_{Algoritmo} - T_{Mejor}}{T_{Mejor}} \times 100 \qquad (4\text{-}6)$$

Donde $\boldsymbol{T_{Algoritmo}}$ es la tardanza promedio obtenida por la variante en evaluación para la instancia respectiva y $\boldsymbol{T_{Mejor}}$ es el mejor resultado particular conocido para esa misma instancia. La Tabla 4-12 muestra los resultados con respecto a ese indicador.

Tabla 4-12: Comparativo RPD, variantes propuestas del algoritmo y mejores resultados por reglas de prioridad. Resaltado el mejor resultado para cada instancia de prueba

CASO	PLANTA	ABDE	BDE	(1)	ASIGNAR POR IND FLEXIB					ASIGNAR MAYOR TIEMPO DISP.				
					SPT	EDD	JOHN	LS	LCCH	SPT	JOHN	EDD	RAND	LCCA
1	1	**22,7**	338,1	502	279	365	302	512	444	691	665	1004	1023	1176
1	2	**9,2**	54,2	87	101	139	98	220	215	170	182	301	320	360
1	3	**5,3**	82,6	110	85	125	107	167	154	156	181	227	295	296
1	4	**9,5**	57,0	124	67	118	261	193	173	159	150	281	319	370
2	1	**5,3**	155,0	139	111	156	108	164	167	282	276	397	480	494
2	2	**8,3**	30,1	53	73	123	71	147	123	109	118	250	230	275

CASO	PLANTA	ABDE	BDE	(1)	ASIGNAR POR IND FLEXIB					ASIGNAR MAYOR TIEMPO DISP.				
					SPT	EDD	JOHN	LS	LCCH	SPT	JOHN	EDD	RAND	LCCA
2	3	**9,0**	30,8	67	82	125	81	143	136	105	127	184	206	172
2	4	**5,8**	50,0	59	56	105	155	151	123	99	107	222	189	240
3	1	**20,7**	220,6	289	305	252	304	426	260	606	537	750	1094	973
3	2	**33,2**	101,3	95	283	327	256	503	371	303	350	763	680	642
3	3	**10,3**	46,7	88	250	252	237	390	331	235	294	457	483	414
3	4	**34,9**	92,8	152	244	338	539	477	344	274	314	662	734	612
4	1	484,6	**351,3**	6039	11623	6592	6280	5658	14995	19819	17381	11520	25940	28793
4	2	**90,7**	175,8	438	1217	1033	1294	900	1681	1639	1601	1676	2219	2978
4	3	137,0	**73,6**	124	875	717	991	799	1239	966	1204	1085	1631	2138
4	4	**221,4**	236,2	714	1761	1584	3064	1500	2601	2495	2347	2562	4024	4310
5	1	**19,9**	360,3	386	281	267	350	441	710	875	840	879	1672	1226
5	2	**18,9**	112,8	182	393	272	326	512	908	702	606	674	1145	888
5	3	**16,8**	100,5	144	455	183	408	207	811	514	535	349	939	726
5	4	**8,4**	113,7	164	192	182	451	274	501	375	334	412	579	566
6	1	**11,6**	83,6	319	1517	613	1010	1355	1522	2049	1819	718	2943	2608
6	2	261,8	**15,7**	392	3133	1819	1969	4349	3340	2430	2361	1692	4522	6671
6	3	9068,5	**14,7**	750	97950	54658	88264	131951	117125	82926	82531	10970	177616	228617
6	4	339,7	**56,2**	339	2743	1754	4774	3896	3259	2153	2177	1754	4630	5466

En este caso, se dramatiza la diferencia entre las variantes del algoritmo genético y las reglas de prioridad básicas, que muestran valores de RPD muy altos en especial en los casos 4 y 6, donde los mejores resultados de las variantes del algoritmo genético alcanzan soluciones muy cercanas a cero.

(Holthaus & Rajendran, 1997) propusieron el indicador RPI (*Relative Percentage Increase*) que compara los mejores resultados individuales obtenidos por cada variante del algoritmo en cada instancia de prueba. El RPI se calcula con la fórmula presentada en la ecuación

$$RPI = \frac{T_{Mejor\ ésta\ variante} - T_{Mejor\ global}}{T_{Mejor\ global}} \times 100 \qquad (4\text{-}7)$$

Donde $T_{Mejor\ ésta\ variante}$ es el mejor resultado de tardanza obtenido por la variante en evaluación para la instancia respectiva y $T_{Mejor\ global}$ es el mejor resultado particular conocido para esa misma instancia. La Tabla 4-13 muestra los resultados de RPI calculados para las tres variantes propuestas del algoritmo genético.

Tabla 4-13: Comparativo RPI, Variantes propuestas del algoritmo genético. Resaltado el mejor resultado para cada instancia de prueba.

CASO	PLANTA	TRABAJOS	ABDE	BDE	(1)
1	1	89	**0**	279,584515	341,539961
1	2	89	**0**	40,9972291	51,0531659
1	3	89	**0**	69,4224624	60,003497

CASO	PLANTA	TRABAJOS	ABDE	BDE	(1)
1	4	89	**0**	44,7527832	94,5284628
2	1	59	**0**	133,509396	119,257516
2	2	59	**0**	22,1922316	30,8636006
2	3	59	**0**	24,150965	54,3111532
2	4	59	**0**	41,2644995	44,3215231
3	1	40	**0**	184,272346	244,238634
3	2	40	**0**	75,8469667	49,9245414
3	3	40	**0**	8,61865861	66,0727857
3	4	40	**0**	69,4940573	121,232678
4	1	55	83,5803911	**0**	1554,56745
4	2	55	**0**	55,075059	212,477047
4	3	55	20,8143029	**0**	4,2175969
4	4	55	**0**	63,6702585	452,957856
5	1	30	**0**	336,125236	310,725663
5	2	30	**0**	60,5440675	106,706117
5	3	30	**0**	57,1941236	79,801666
5	4	30	**0**	62,0004086	124,757535
6	1	24	**0**	5,30566126	123,425837
6	2	24	212,126602	**0**	74,9406183
6	3	24	6879,43487	**0**	180,834909
6	4	24	274,018602	**0**	74,5139215

Como se está modelando tardanza media y la tardanza puede ser igual a cero cuando todos los trabajos se terminan dentro del plazo de entrega, se utilizó el indicador RDI (*Relative Deviation Index*) propuesto por (Y. Kim, 1993), que permite comparar en una misma escala, valores de variables como la tardanza, que eventualmente pueden llegar a valer cero, sin el riesgo de que el indicador llegue a presentar un valor indeterminado. El indicador se calcula con la ecuación (4-8).

$$RDI = \frac{T_{Variante} - T_{Mejor}}{T_{Peor} - T_{Mejor}} \quad (4\text{-}8)$$

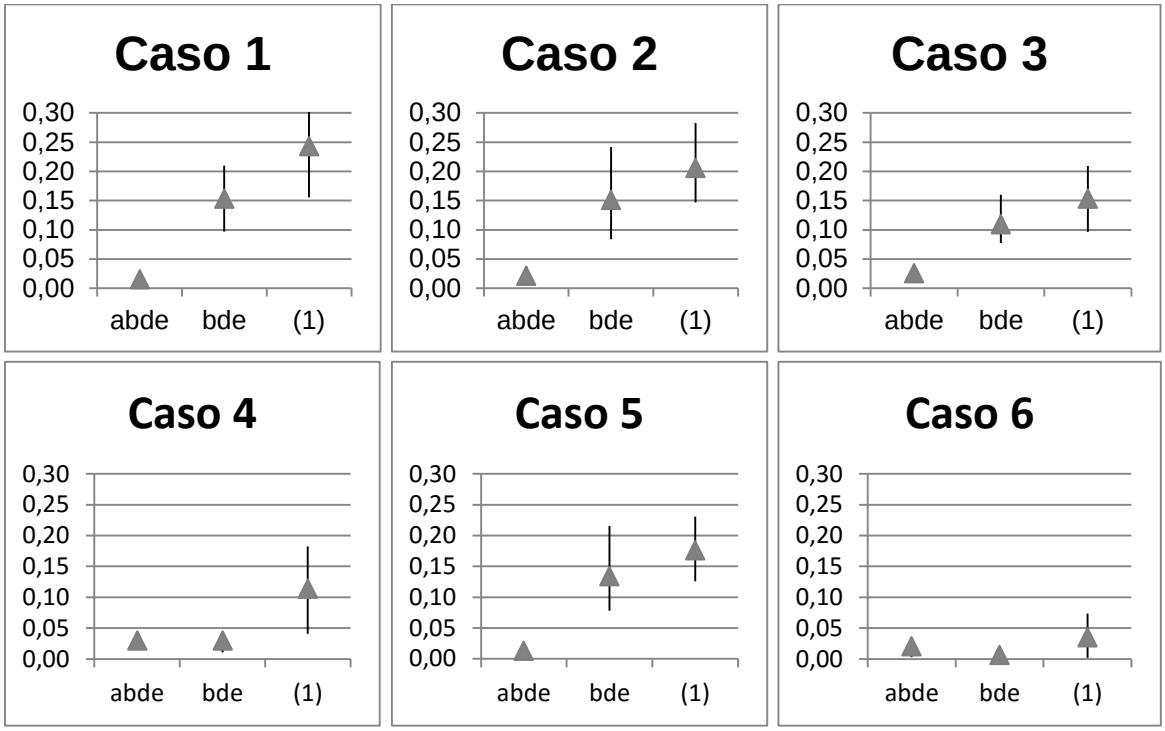
Donde $T_{Variante}$ es la tardanza promedio obtenida por la variante en evaluación para la instancia respectiva; T_{Mejor} es el mejor resultado particular conocido para esa misma instancia y T_{Peor} es el peor resultado que se ha obtenido para la instancia correspondiente. Como parte de la comparación se presentan los mejores resultados obtenidos con las reglas de prioridad (descritas en la sección 3.2.2) tanto con la asignación por índice de flexibilidad propuesta en la sección 3.2.1, como con la asignación a máquina con mayor tiempo disponible, como se utiliza en la variante básica codificada como (1), dado que al haber restricción de elegibilidad y máquinas paralelas no relacionadas, el criterio de asignación incide en el cálculo de la tardanza, independientemente del tipo de algoritmo usado para la secuenciación.

Tabla 4-14: Comparación resultados propuestas de variantes del algoritmo genético y mejores resultados de reglas de prioridad según RDI. Resaltado el mejor promedio para cada instancia.

		VARIANTES			ASIGNA CON ÍNDICE FLEXIBILIDAD					ASIGNA MAYOR TIEMPO DISPONIBLE				
CASO	PLANTA	ABDE	BDE	(1)	SPT	EDD	JOHN	LS	LCCH	SPT	JOHN	EDD	ALEA	LCCA
1	1	**0,01**	0,21	0,31	0,17	0,23	0,19	0,32	0,28	0,43	0,41	0,62	0,63	0,73
1	2	**0,02**	0,10	0,16	0,18	0,25	0,17	0,39	0,38	0,30	0,33	0,54	0,57	0,64
1	3	**0,01**	0,19	0,26	0,20	0,29	0,25	0,39	0,36	0,37	0,43	0,53	0,69	0,70
1	4	**0,02**	0,11	0,25	0,13	0,24	0,52	0,38	0,34	0,32	0,30	0,56	0,63	0,73
2	1	**0,01**	0,24	0,22	0,17	0,24	0,17	0,26	0,26	0,44	0,43	0,62	0,75	0,77
2	2	**0,02**	0,08	0,15	0,20	0,34	0,20	0,41	0,34	0,30	0,33	0,70	0,64	0,77
2	3	**0,04**	0,13	0,28	0,34	0,53	0,34	0,60	0,57	0,44	0,53	0,78	0,87	0,73
2	4	**0,02**	0,15	0,18	0,17	0,31	0,46	0,45	0,37	0,30	0,32	0,67	0,57	0,72
3	1	**0,01**	0,16	0,21	0,22	0,18	0,22	0,31	0,19	0,44	0,39	0,54	0,79	0,71
3	2	**0,03**	0,10	0,10	0,29	0,33	0,26	0,51	0,38	0,31	0,35	0,77	0,69	0,65
3	3	**0,02**	0,08	0,15	0,41	0,42	0,39	0,65	0,55	0,39	0,49	0,76	0,80	0,69
3	4	**0,04**	0,10	0,16	0,26	0,36	0,58	0,51	0,37	0,29	0,34	0,71	0,79	0,66
4	1	0,01	**0,01**	0,18	0,35	0,20	0,19	0,17	0,45	0,60	0,53	0,35	0,78	0,87
4	2	**0,02**	0,04	0,11	0,30	0,26	0,32	0,22	0,42	0,41	0,40	0,42	0,55	0,74
4	3	0,04	**0,02**	0,04	0,29	0,23	0,32	0,26	0,40	0,31	0,39	0,35	0,53	0,70
4	4	**0,04**	0,04	0,12	0,30	0,27	0,53	0,26	0,45	0,43	0,40	0,44	0,69	0,74
5	1	**0,01**	0,22	0,23	0,17	0,16	0,21	0,26	0,42	0,52	0,50	0,53	1,00	0,73
5	2	**0,01**	0,08	0,13	0,27	0,19	0,23	0,35	0,63	0,49	0,42	0,47	0,79	0,61
5	3	**0,02**	0,10	0,14	0,45	0,18	0,41	0,21	0,81	0,51	0,53	0,35	0,94	0,72
5	4	**0,01**	0,14	0,20	0,24	0,23	0,56	0,34	0,63	0,47	0,42	0,51	0,72	0,71
6	1	**0,00**	0,02	0,07	0,35	0,14	0,23	0,31	0,35	0,47	0,42	0,17	0,68	0,60
6	2	0,02	**0,00**	0,03	0,26	0,15	0,16	0,36	0,28	0,20	0,20	0,14	0,37	0,55
6	3	0,02	**0,00**	0,00	0,26	0,15	0,23	0,35	0,31	0,22	0,22	0,03	0,47	0,61
6	4	0,03	**0,01**	0,03	0,26	0,17	0,46	0,37	0,31	0,21	0,21	0,17	0,44	0,52

En forma consistente con respecto a los resultados de la primera fase, la variante ABDE que incluye la asignación por índice de flexibilidad presenta mejores resultados en los casos con mayor número de trabajos a asignar y en las plantas con más etapas con elegibilidad de máquinas. La variante BDE es mejor en los casos con pocos trabajos como el caso 6 o predominancia de trabajos pequeños como el caso 4, y en plantas como la 3, que sólo tiene elegibilidad en la segunda etapa. Para mayor claridad sobre esta apreciación, la Figura 4-2 muestra el comparativo entre las 3 variantes para cada uno de los casos.

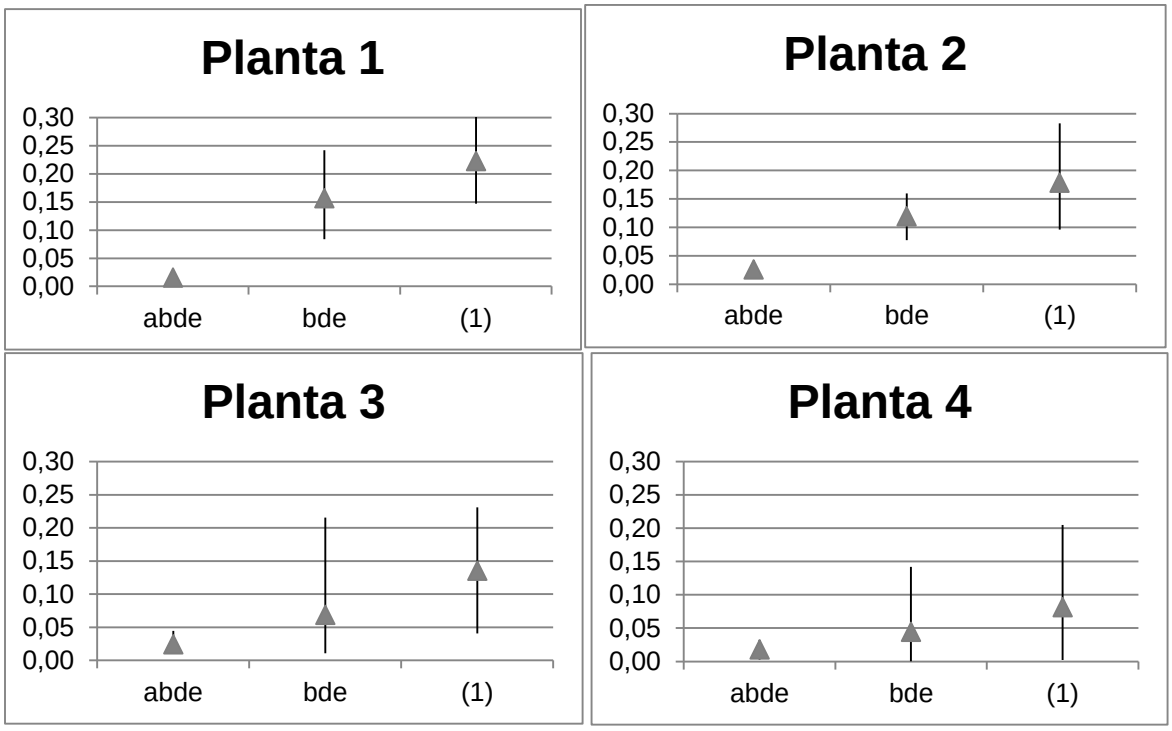
Figura 4-2: Rangos de RDI por caso en cada variante propuesta.



Se aprecia el mejor desempeño de la variante ABDE en los casos 1, 2, 3 y 5, y de la variante BDE en los otros 2 casos. Los casos en los que es más competitivo ABDE son los que acumulan trabajos de mayor tamaño.

En la Figura 4-3, se aprecia el desempeño de las variantes del algoritmo con respecto a las plantas de producción modeladas para las instancias de prueba.

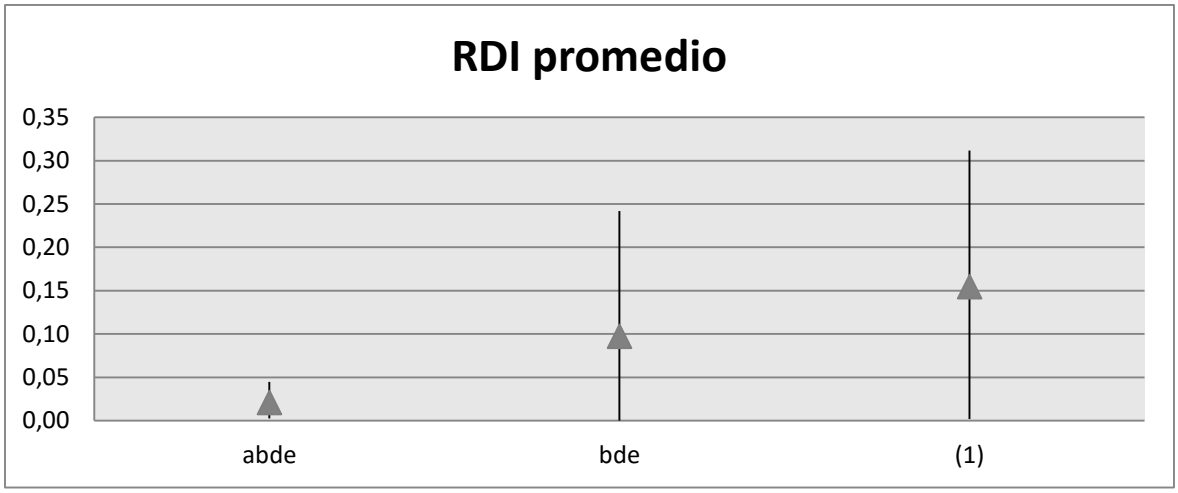
Figura 4-3: Rangos de RDI por planta en cada variante propuesta.



La variante ABDE presenta mejor desempeño en promedio en todas las plantas, con muy poca variabilidad del indicador RDI, lo que significa que no solo se acerca más frecuentemente al mejor valor sino que, además, todos los valores están muy próximos entre sí, evidenciando la convergencia del algoritmo hacia valores próximos al mejor conocido.

En cuanto a la eficacia general de cada una de las tres variantes del algoritmo, la Figura 4-4 ilustra los rangos de valores de RDI obtenidos promediando todas las instancias de prueba.

Figura 4-4: Resultados de RDI por variante promediando todos los resultados de todas las instancias.



Se evidencia una mejor eficacia y menor variabilidad en la variante ABDE. La variante básica (1) es en promedio menos eficaz en acercarse a las mejores soluciones con una variabilidad mayor que la de las otras dos variantes del algoritmo.

Siendo el RDI es un indicador independiente de la escala de valores, resulta interesante verificar si existe diferencia significativa en sus valores, asignable a las instancias de prueba, a las variantes del algoritmo o a la interacción entre ambos. La Tabla 4-15 muestra los resultados del análisis de varianza de dos factores con 10 muestras por grupo aplicada a la totalidad de resultados de RDI de los experimentos de la segunda fase.

Tabla 4-15: Análisis de varianza RDI Factores: Instancias de prueba y variantes del algoritmo. Nivel de confianza = $1 - \alpha = 0{,}95$

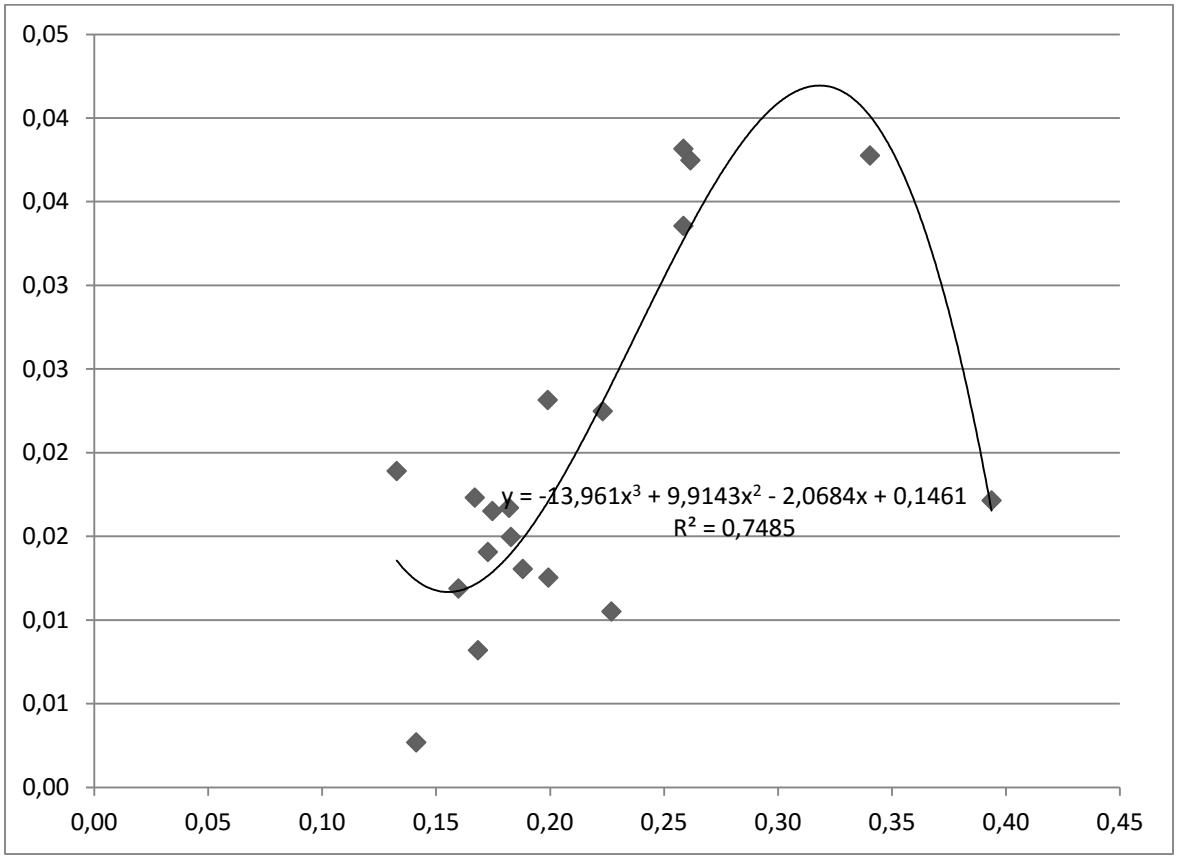
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Instancia de prueba	13541,92966	23	588,779550	1195,587754	0	1,545961
Variante del algoritmo	228,25060	2	114,125300	231,745161	1,1936E-76	3,009624
Interacción Instancia-Variante	522,15248	46	11,351141	23,049858	3,7508E-107	1,385591
Dentro de los grupos	319,11430	648	0,492460			
Total	14611,44704	719				

El resultado del análisis de varianza indica que tanto las instancias de prueba, como las variantes del algoritmo y la interacción entre instancias y variantes muestran diferencias significativas en sus resultados de RDI. Se podría decir, entonces, que la eficacia de cada variante del algoritmo en términos de acercarse o no al mejor resultado en un problema específico depende tanto de la variante como de las características del

problema, de manera que no se pueda esperar que una sola variante del algoritmo genere siempre los mejores resultados, y sea el mejor para todas las instancias.

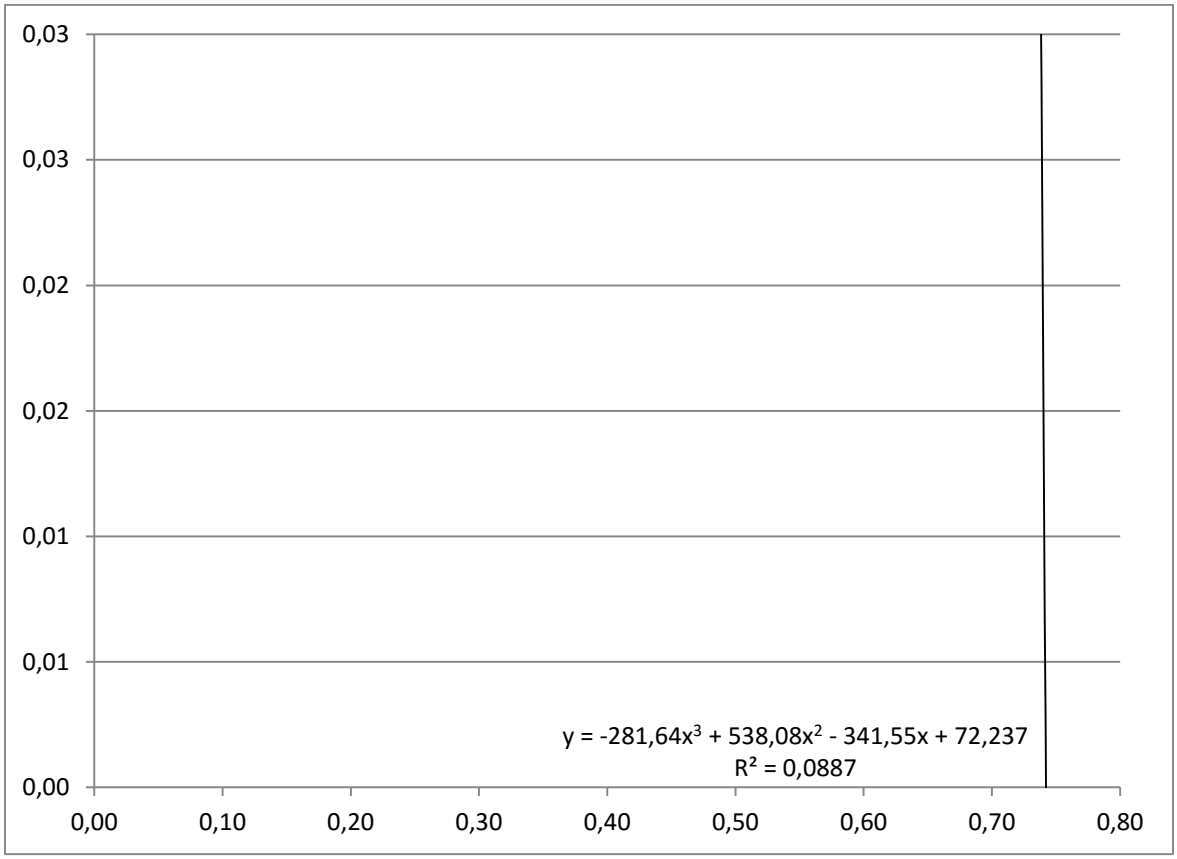
La mejor eficacia de cada una de las variantes ABDE y BDE, está íntimamente relacionada con la generación de la población inicial, el factor B, que fue seleccionado en la primera fase como el factor con influencia más favorable para obtener buenos resultados. Consistentemente, en las instancias en las que cada algoritmo obtuvo el mejor valor promedio de RDI, se encuentra correlación moderadamente alta entre la asignación por índice de flexibilidad (factor A) con los resultados del algoritmo ABDE y entre la asignación por mayor tiempo disponible con los resultados del algoritmo BDE, como se puede comprobar en la Figura 4-5 y en la Figura 4-6.

Figura 4-5: Gráfico de regresión que ilustra la incidencia de la población inicial (reglas de prioridad) usando asignación por índice de flexibilidad en el RDI del resultado final por la variante ABDE.



La correlación llega a 0,75, entre el mejor RDI de las reglas de prioridad combinadas con asignación por índice de flexibilidad y el RDI promedio de la variante ABDE que incluye ese mismo criterio de asignación.

Figura 4-6: Gráfico de regresión que ilustra la incidencia de la población inicial (reglas de prioridad) usando asignación por máximo tiempo disponible en el RDI del resultado final por la variante BDE.

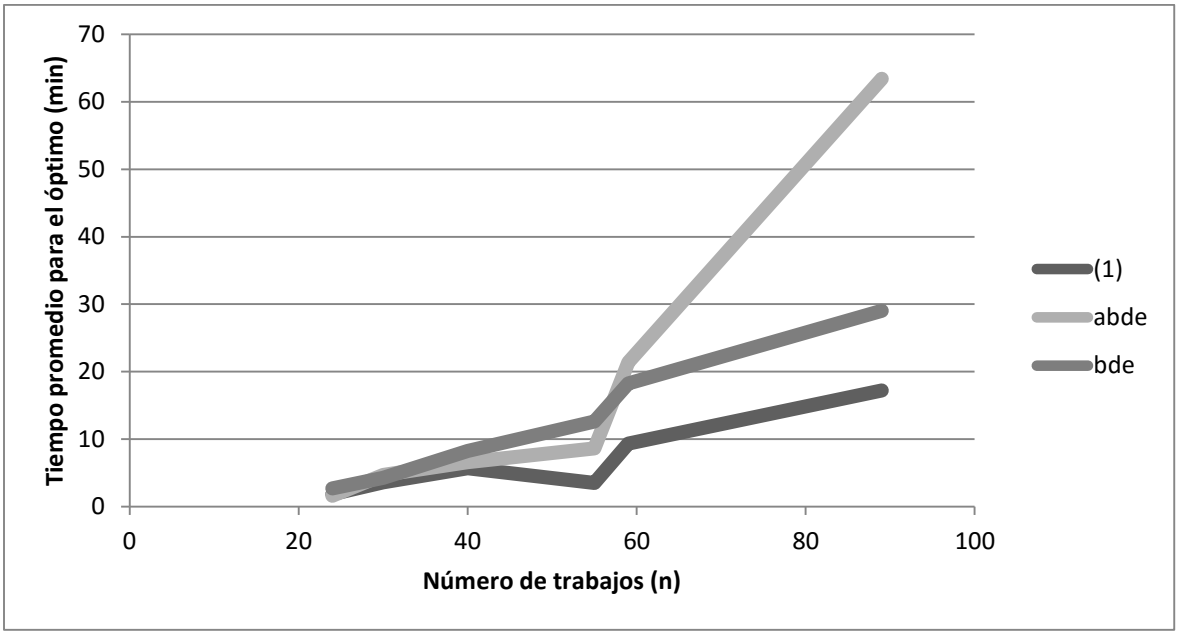


El coeficiente de correlación con valor de 0,99 indica la alta correspondencia entre los valores del mejor RDI obtenido con las reglas de prioridad usando asignación por mayor tiempo disponible y los resultados promedio de RDI de la variante BDE que usa ese mismo tipo de asignación.

Con estos dos gráficos, se encuentra que la calidad de los resultados de las variantes del algoritmo genético se relaciona con la "semilla" utilizada para formar la primera población, resaltando la utilidad de basar las soluciones iniciales en un conjunto de heurísticas (como las reglas de prioridad), que involucran criterios de secuenciación calculados a partir de características del problema, logrando "orientar" el algoritmo hacia mejores soluciones.

La eficiencia computacional de las variantes del algoritmo, en cuanto al tiempo de procesamiento requerido para llegar a la solución, cumpliendo el criterio de parada se muestra en la Figura 4-7.

Figura 4-7: Tiempos computacionales (en minutos) para llegar a la solución vs número de trabajos a secuenciar en el problema a resolver.



En los casos con alto número de trabajos a programar, la mayor calidad de los resultados obtenidos tiene como costo un mayor tiempo de procesamiento para cumplir la condición de parada, siendo mucho más alto el tiempo requerido por la variante ABDE que obtuvo los mejores resultados en esos casos y más baja en el algoritmo básico (1), que obtuvo los resultados más modestos.

En los casos con menor cantidad de trabajos a secuenciar, los tiempos computacionales son muy similares entre los tres algoritmos, con mayores valores para la variante BDE que mostró mejores resultados en esos casos.

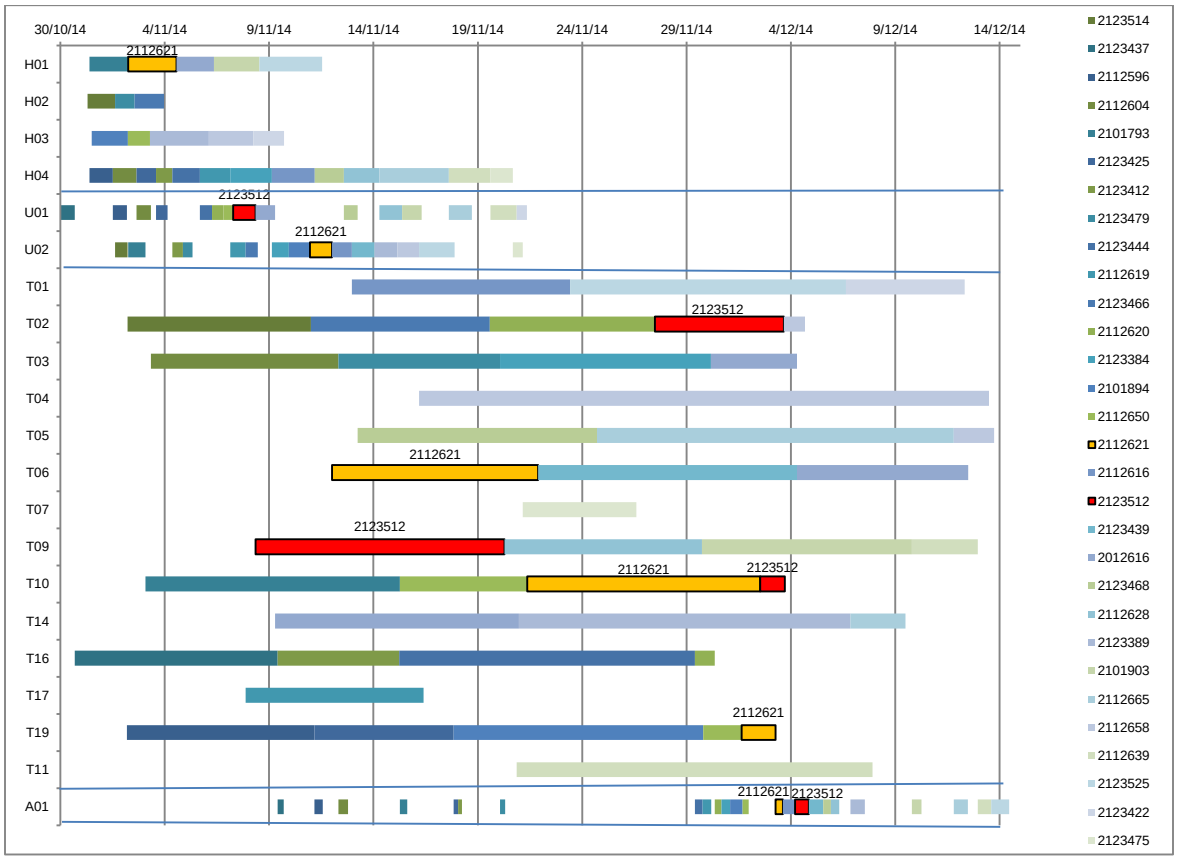
4.3.4Discusión de los resultados

El trabajo de (F. Defersha, 2011) era hasta el momento el modelado más completo de los que se encuentran en la literatura respecto al *flow shop* híbrido flexible. El presente trabajo lo supera por estar respaldado por un conjunto de pruebas computacionales mucho más significativo y por tener un modelado más completo de la subdivisión en sub-lotes. Los valores de función objetivo no son comparables, dado que (F. Defersha, 2011) minimizó *makespan* y en el presente trabajo se minimiza la tardanza media.

En el trabajo de (F. Defersha, 2011) se incluyó un solo ejemplo de prueba. Aquí se hicieron 2304 corridas en la primera fase y 720 en la segunda fase sobre un conjunto de 24 instancias de prueba. En el trabajo de (F. Defersha, 2011), el mayor aporte es el modelado de la maleabilidad, demostrando que en el *flow shop* híbrido (sea flexible o no) es más útil dividir lotes que en otras configuraciones *flow shop*. En ese trabajo los lotes son generados con tamaños aleatorios y conservan el mismo tamaño etapa tras etapa.

En la presente investigación no solo se modeló la maleabilidad, permitiendo dividir los trabajos en sub-lotes, sino que además se calcularon los tamaños de los sub-lotes consistentemente con la unidad comercial de cada producto y se permitió un tamaño variable entre etapas. En la Figura 4-8 se muestra el mejor resultado por la variante ABDE para la instancia de prueba que secuencia el caso 5 en la planta 4. Se han resaltado dos trabajos que hacen uso de la maleabilidad y del tamaño de lote variable entre etapas.

Figura 4-8: Gráfico Gantt resultado de la secuenciación para el caso 5 (30 trabajos) en la planta 4 (5-2-20-1). Mejor resultado con variante ABDE.



Los trabajos 2112621 resaltado en color naranja, y 2123512 resaltado en color rojo se subdividen en tres lotes de diferente tamaño en la etapa 3 permitiendo su procesamiento en paralelo, para luego volver a integrarse en la etapa 4. Nótese que el trabajo 2123512 no pasa por la etapa 1. En el Anexo L (página 150) se muestra en detalle la programación correspondiente a esta misma instancia para mayor claridad

La ilustración sirve para probar que el modelo aprovecha la maleabilidad y programa efectivamente los lotes variables entre etapas, condición que no se encontró modelada en ningún trabajo anterior de la literatura sobre *flow shop* híbrido flexible. Esa característica es muy común en la industria textil en general, incluido el subsector de tejidos técnicos y en muchas otras industrias que tienen la configuración *flow shop*

híbrido flexible, y en este trabajo se está modelando y teniendo en cuenta en la solución por primera vez.

En cuanto a los trabajos que, al igual que éste, minimizaron tardanza en un *flow shop* híbrido flexible, se encuentran tres trabajos (J. Li et al., 2015; Sioud et al., 2014c; Yalaoui, Amodeo, Yalaoui, & Mahdi, 2010) que minimizaron tardanza total y otros tres (Attar, Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam, et al., 2013; Karimi et al., 2010; Zandieh & Karimi, 2010) que hicieron optimización bi-objetivo minimizando *makespan* y tardanza total. Ningún trabajo, antes que este, tuvo como objetivo minimizar tardanza media, sin embargo, se puede intentar una comparación dado que el paso de uno a otro indicador es relativamente obvio dividiendo por el número de trabajos programados.

(J. Li et al., 2015) presenta la solución por colonia de abejas de un problema basado en datos de una empresa real. Aparte del objetivo de la tardanza, de trabajar sobre una planta de más de 2 etapas y de la utilización de datos basados en la realidad, ese trabajo no modeló ninguna otra condición de entorno real. El reporte de los resultados sobre instancias de entre 40 y 152 trabajos sobre la misma planta, no permite comparaciones frente al presente trabajo.

(Sioud et al., 2014c) minimizaron tardanza total considerando máquinas paralelas no relacionadas, tiempo de montaje dependiente de la secuencia y elegibilidad para un conjunto de datos de prueba de entre 20 y 120 trabajos. Sus resultados de RPD los compara frente a heurísticas como EDD y LS (SLACK). Teniendo en cuenta que el RPD es un indicador relativo, que por definición elimina la distorsión provocada por la escala de los datos, se pueden comparar esos resultados con los de la presente investigación.

Comparando los resultados de las heurísticas frente a la propuesta de la investigación, (Sioud et al., 2014c) obtivieron con su algoritmo SWAP un RPD promedio menor un 89,7% que del RPD obtenido con EDD, En la presente investigación, se obtiene un RPD promedio de los mejores resultados de las variantes ABDE y BDE, menor en un 93,6% que el de la regla EDD. En Holgura (SLACK o LS), el trabajo de (Sioud et al., 2014c) obtuvo un RPD en el algoritmo SWAP, menor en un 94,8% que el obtenido con la regla de Holgura. Este trabajo obtiene un RPD en los mejores resultados de las variantes ABDE y BDE, menor en un 95%.

Asumiendo una eficiencia similar de las reglas de prioridad EDD y LS en los casos de este trabajo y los del trabajo de (Sioud et al., 2014c), (aunque éste último maneja instancias de entre 2 y 8 etapas pero con solo hasta 4 máquinas por etapa), los resultados de las varaintes de algoritmo propuestas en esta investigación han logrado mejores resultados que la propuesta mencionada.

(Yalaoui et al., 2010) probó sus resultados sobre un conjunto de 125 instancias muy simples sobre una planta de solo 2 etapas con 5 máquinas cada una. El tamaño reducido le permitió compararse frente al óptimo global obtenido por enumeración explícita completa. Las características de ese trabajo y los indicadores usados para los resultados impiden cualquier comparación frente a la presente investigación. Su modelado es

mucho más simple, y de las condiciones de entorno real solo consideró que las máquinas son no relacionadas, que hay elegibilidad y que la función objetivo tiene en cuenta el plazo de entrega. Este trabajo lo supera en consideración de condiciones de entorno real y experimentación sobre un conjunto de datos de mayor complejidad.

En los trabajos multi-objetivo, que incluyeron la tardanza como una de las funciones a optimizar, se encuentra que (Attar, Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam, et al., 2013), que modelaron máquinas paralelas no relacionadas, tiempos de montaje dependientes de la secuencia, y más de tres etapas, afirman en sus conclusiones que los trabajos futuros deben tener en cuenta la elegibilidad de las máquinas, condición considerada en la presente investigación. Sus resultados numéricos no son comparables con este trabajo, pero los tiempos computacionales que reportan, entre 3000 y 8000 segundos (50 a 133 minutos) con entre 60 y 100 trabajos, para el algoritmo MOPSO son más altos que los que se obtuvieron en esta investigaión para la variante de algoritmo de mayor tiempo de procesamiento (ABDE) que registra en promedio 21 minutos para el caso de 59 trabajos y 63 minutos para el caso de 89 trabajos, sobre plantas más complejas que las reportadas en el caso multi-objetivo de (Attar, Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam, et al., 2013)

Los trabajos de (Karimi et al., 2010; Zandieh & Karimi, 2010) son bastante similares. Su modelado de condiciones de entorno real es limitada a hacer optimización multiobjetivo con tiempos de montaje dependientes de la secuencia en una propuesta para una planta con tres o más etapas. Las pruebas se hacen sobre 30 casos pequeños con entre 3 y 12 trabajos a secuenciar. Sus resultados hacen más énfasis en los valores obtenidos para *makespan* y usan indicadores propios basados en el diseño de sus algoritmos que hace que no sean comparables con esta investigación, que supera a aquella en el modelado de las condiciones realistas.

Los resultados, aparte de la comparación frente a los antecedentes de la literatura, muestran que se ha logrado un modelado robusto, amplio, detallado de un problema de programación de producción bastante común en la realidad de la industria. Se ha hecho una experimentación detallada para llegar a un diseño de dos algoritmos que han mostrado buen desempeño en la solución de este tipo de problemas.

Dado que las variantes propuestas al algoritmo genético reducen la tardanza media entre un 32% y un 99% con respecto al mejor resultado que se puede obtener por reglas de prioridad básicas (de uso común en la industria), se encuentra que es posible mejorar los tiempos de entrega en industrias como la de tejidos técnicos con una metodología de programación de la producción aplicable a las empresas textiles, que considera las características de sus procesos, las particularidades de su proceso productivo aplicando técnicas inteligentes como los algoritmos genéticos.

Otras variables de interés, se pueden considerar igualmente mejoradas con este trabajo. Al reducir la tardanza se reduce la penalidad por no entregar a tiempo, así mismo se aprovechan mejor los recursos productivos y se tiene una programación más ordenada de la planta. La programación generada permite integrar trabajos similares reduciendo

tiempos de montaje que implican ahorros de tiempo y recursos. Al no requerirse más que secuenciar, subdividir y asignar los trabajos de acuerdo al resultado de los algoritmos, sin inversiones adicionales en tecnologías duras o en contratación de personal; se puede afirmar que el modelo reduce costos de producción permitiendo la entrega de más productos en menor tiempo. Al reducir la tardanza, no sólo se cumplen las fechas de entrega sino que se está reduciendo el tiempo de procesamiento permitiendo mejores tiempos de respuesta. Esa mayor agilidad permite reducir también los inventarios de producto en proceso.

De esta manera se puede dar por probada la hipótesis de trabajo formulada al inicio de la presente investigación.

4.4 Conclusiones del capítulo

La experimentación detallada de todas las combinaciones de modificaciones propuestas al algoritmo genético básico y el análisis estadístico realizado sobre sus resultados, permitieron seleccionar las propuestas de modificación aplicables a las propuestas definitivas para obtener los mejores resultados.

Las variantes del algoritmo genético de las propuestas definitivas demostraron su eficacia para la solución del problema con resultados mejores que todas las reglas de prioridad y el algoritmo genético básico. Sus tiempos de respuesta y la calidad comparativa de las soluciones obtenidas demuestran su utilidad para su aplicación en entornos productivos reales.

La discusión de resultados frente otros trabajos de la literatura demuestra que el modelo presentado es más realista que los que se encuentran publicados sobre el *flow shop* híbrido flexible, que su eficiencia computacional es apropiada y que la experimentación sobre datos reales permitió llegar a un modelo más completo que todos los antecedentes y que la propuesta de solución encontrada es eficaz para llegar a resultados apropiados a las características de cada problema.

Los resultados muestran que no siempre el mismo algoritmo es aplicable a todas las situaciones de programación que pueden darse en la industria. Cada problema tiene características que hacen que algunas condiciones del algoritmo mejoren o empeoren los posibles resultados. La configuración de las soluciones para su implementación real debe considerar esas diferencias, permitiendo la selección del mejor método aplicable.

5. Conclusiones Generales

Las empresas colombianas fabricantes de tejido técnico priorizan en sus políticas de producción, los tiempos de respuesta a los clientes, los costos y el cumplimiento de entregas; se consideran competitivas en calidad y tiempos de entrega pero adolecen de falta de automatización en los procesos de programación de producción en los que la mayoría muestra insatisfacción con las herramientas informáticas que utilizan en ese tipo de tareas.

Para la programación de la producción en entornos afines a la industria textil se encuentra preferencia en la literatura por técnicas como los algoritmos genéticos y otras metaheurísticas, con predominancia en la función objetivo de minimizar *makespan* y modelado de pocas particularidades o características de la producción real. La mayoría de los trabajos simplifican demasiado el problema reduciendo la posibilidad de implementación en entornos reales. Es una rareza que algún investigador use datos basados en una empresa real. No obstante, los resultados de las investigaciones académicas permiten probar algoritmos que eventualmente se pueden adaptar a situaciones más complejas como las de la realidad empresarial.

Se prueba, en la propuesta de minimizar tardanza media con algoritmos genéticos, que sí es posible modelar e implementar hasta nueve situaciones deseables de entorno real para programar la producción. Fue posible incorporar en la solución tanto los tiempos de montaje dependientes de la secuencia como el paralelismo entre máquinas no relacionadas, la maleabilidad, el lote de trasferencia variable, la restricción de elegibilidad, la entrada dinámica (que permite que la programación sea proactiva y recativa), los datos basados en entorno real, la función objetivo basada en fecha de entrega o costo y el número de etapas superior a dos. Las innovaciones incorporadas para el modelado y la solución del problema incluyen el modelo matemático completo y original, considerando por primera vez en el *flow shop* híbrido flexible el tamaño de lote variable entre etapas y haciendo un modelado más realista de la maleabilidad. También es innovador el índice de flexibilidad propuesto para la asignación de trabajos en las etapas con paralelismo, y la generación de la población inicial por reglas de prioridad que no se había utilizado hasta el momento en los trabajos sobre este tipo de configuración productiva. Se innova también en la propuesta de operador de cruzamiento, redefinido a partir de antecedentes de la literatura, con adaptación a las características del tipo de problema tratado. Y se innova al proponer una probabilidad de mutación variable que

tampoco se había utilizado en los trabajos sobre secuenciación en *flow shop* híbrido flexible. La metodología utilizada, con una fase previa de filtro para encontrar las propuestas definitivas, aportó a generar unas mejores propuestas de solución y es innovadora para este tipo de trabajos.

Se aplicó un diseño experimental 2^5 para la prueba de las propuestas de modificación. El análisis estadístico del conjunto de modificaciones y luego de las propuestas definitivas utilizó herramientas como el análisis de varianza, el cálculo y comparación de indicadores comunes a los trabajos de secuenciación como RDI, RPD y RPI, el uso de gráficos estadísticos de diferentes tipos, el cálculo de coeficientes de correlación, la generación de resultados en tablas y gráficos de GANTT, entre otros. El producto de esta investigación es un modelo bastante completo e integral para la programación de cualquier planta de producción que tenga una configuración orientada al producto. Al considerar el modelo de *flow shop* híbrido flexible que implica paralelismo y omisión ocasional de etapas y tener además en cuenta nueve situaciones de entornos reales, la propuesta presentada permite programar tanto los sistemas complejos que involucran las situaciones consideradas como los otros sistemas más simples para los que bastaría con asumir iguales a cero las variables que no apliquen. Más que a una industria en particular o a un subsector, esta propuesta le es útil a la industria en general y su aporte se puede potenciar mejor en la producción industrial real que en los ámbitos académicos.

6. Recomendaciones

El hecho de que no hay un solo algoritmo estándar que ofrezca la mejor solución en todos los casos que se planteen, implican que el modelado de soluciones que implementen este y otros modelos de programación de producción deben tener la flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones y deben examinar las características del problema para configurar la propuesta de solución más conveniente.

Contar con un modelado tan completo como el producto de esta investigación representa un aporte que debe aprovecharse para contribuir a mejorar la competitividad de la industria, mediante su adaptación e implementación en diferentes entornos productivos. Las condiciones realistas modeladas aquí, en conjunto, son comunes a las diferentes ramas del sector textil y a muchos otros sectores industriales; y en este trabajo están por primera vez juntas, con el potencial de aproximarse a ser una herramienta que aporte al mejoramiento del cumplimiento de entregas y de otros indicadores en las industrias.

Las innovaciones introducidas aquí pueden ser útiles en diferentes entornos. Implementar las propuestas probadas en la presente investigación en productos informáticos con fines comerciales y académicos permitirá no solo la divulgación amplia de los resultados del presente trabajo, sino que además contribuirá al mejor entendimiento y aplicación de los temas aquí tratados en un conjunto de diferentes contextos.

Es importante que la industria se apropie de este tipo de experiencias. El conjunto de conocimientos aquí aplicados, las innovaciones propuestas y los resultados obtenidos son de interés no sólo en el contexto académico en el que se desarrolló, sino, sobre todo, en los ambientes industriales objeto de estudio. La industria de tejidos técnicos y los otros subsectores textiles, así como los otros sectores industriales con configuraciones afines a la estudiada en esta investigación deben conocer este tipo de contenidos que pueden aportar claridad en la comprensión de sus problemáticas y dar luces sobre alternativas científicas para resolverlas.

Las temáticas sobre programación de la producción, y metodologías de secuenciación y asignación son bastante amplias y su interés trasciende los ámbitos académicos. Continuar profundizando en condiciones realistas de diversos entornos productivos y experimentando sobre técnicas de solución apropiadas para cada una de esas

condiciones y de esos entornos es una línea de trabajo que debe sostenerse y enriquecerse con el conocimiento sobre las dinámicas empresariales y los avances de las tecnologías de producción y de procesamiento de la información.

7. Líneas de trabajo futuro

Esta investigación puede servir de punto de partida a proyectos de aplicación de otras técnicas inteligentes al modelado completo de la programación de producción, así como al desarrollo de propuestas que se ocupen de otras configuraciones diferentes a las orientadas al producto.

Los parámetros de operación de las variantes propuestas del algoritmo genético, pueden afinarse en una posible futura investigación que, con un diseño experimental apropiado, busquen los valores más convenientes de los tamaños de población, número de puntos de cruce, criterios de parada, probabilidades de mutación, etc. que mejoren el desempeño de los algoritmos en la solución de diversos tipos de problemas.

Igualmente, resulta interesante continuar analizando el desempeño de las variantes propuestas, contrastando los resultados que se pueden obtener con estas variantes del algoritmo genético frente a los que pueden calcularse con otras técnicas poblacionales, variando las condiciones del problema, la función objetivo y otras características relevantes.

La extensión de los resultados del presente trabajo, en especial los componentes de innovación propuestos y probados, a otros entornos productivos y a otras problemáticas tanto de programación de producción como de otras áreas de conocimiento, permitirá aprovechar de mejor manera los productos del presente trabajo y contribuirán a la mejora de la competitividad de las organizaciones.

La implementación completa en un producto informático estándar que pueda ser utilizado por cualquier industria con configuración orientada al producto debe ser una consecuencia directa de este desarrollo. Se recomienda que ese tipo de desarrollos se efectúe sobre herramientas actuales que aprovechen las facilidades de comunicación y almacenamiento flexible que pueden potenciar la actualización permanente de la información y la integración con otras herramientas empresariales.

Dada la naturaleza estocástica de un grupo significativo de las variables de entrada consideradas y dada la complejidad del problema, resulta interesante combinar las soluciones propuestas con técnicas como la simulación de procesos, buscando modelos

más realistas y permitiendo probar alternativas diferentes de solución involucrando las condiciones de entorno real modeladas en este trabajo.

La consideración del proceso de secuenciación de producción como una parte de la cadena de suministro total será cada vez más importante en la búsqueda de soluciones aplicables en las empresas reales. El problema considerado es apenas un eslabón en un esquema que involucra los suministros de materias primas y las entregas de productos terminados a los clientes en modelados de sistemas logísticos que deben considerarse integralmente buscando eficiencia en la totalidad del proceso logístico.

A. Anexo: Cuestionario Encuesta Estado actual de la Programación de la Producción en las empresas Colombianas fabricantes de Tejidos Técnicos

FECHA:_____

EMPRESA: _____ TELEFONO:_____

DIRECCIÓN:_____ E-MAIL:_____

ENCUESTADO:_____

CARGO:_____

1. De acuerdo al marco de referencia estratégico de su organización, cómo calificaría la importancia de los siguientes factores como criterios para programar la producción

(0=Sin Importancia; 1=Importancia moderada; 3= Importancia media; 4 = Importancia Alta y 5 = Importancia muy alta)

VARIABLE	**IMPORTANCIA**					
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Tiempo total de procesamiento						
Tardanza / anticipación entrega						
Inventario en proceso						
Costo Unitario de producción						

2. Señale cuál de las siguientes frases describe mejor el pensamiento que guía las decisiones sobre capacidad en la planta:

   __ Se debe procurar el mejor aprovechamiento de la capacidad instalada, manteniendo ocupado el sistema productivo, aun a costa de generar inventario sin certeza de su venta.

   __ Se debe producir solo lo que se requiere, con un mínimo inventario en proceso entre estaciones, generando lo que requieren los clientes en el momento justo que hay que fabricarlo, así se tengan recursos ociosos o grandes fluctuaciones en la contratación de personal.

   __ Se debe propender por un equilibrio entre la estabilidad del personal, el uso adecuado de los recursos productivos y el cumplimiento de los compromisos de la demanda, así eso implique en algunos casos generar algunos inventarios y, en otros, tener recursos sin uso.

3. Usted considera que lo que sucede con las fechas de entrega pactadas por parte de la empresa, para con sus clientes, la mayor parte del tiempo es:
   ___ Siempre se cumple
   ___ En muy contadas ocasiones no se cumple
   ___ Se cumple la mayoría de las veces
   ___ Se cumple aproximadamente la mitad de las veces
   ___ Casi nunca se cumple
   ___ Nunca se cumple

4. Cómo califica la importancia de las siguientes fuentes de perturbación en las decisiones sobre programación de la producción:

(0=Sin Importancia; 1=Importancia moderada; 3= Importancia media; 4 = Importancia Alta y 5 = Importancia muy alta)

FUENTE DE PERTURBACIÓN	**IMPORTANCIA**					
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Diferencias de rendimiento, capacidad, versatilidad entre máquinas paralelas (de una misma etapa)						
Variabilidad del tamaño de los lotes de producción y transferencia entre diferentes etapas						
Tiempos de montaje dependientes de la secuencia						
Maleabilidad de los pedidos (posibilidad de dividir o juntar pedidos para que los tamaños se adecúen a las capacidades estándar de las máquinas)						
Entrada dinámica (Variabilidad de la demanda, adiciones, cancelaciones, cambios en las cantidades, referencias o fechas de entrega programadas: Hace programación proactiva y reactiva)						

5. Para programar la producción, la empresa utiliza herramientas informáticas en:

Instancia de Programación	Herramienta	Integración con otras	Aplicación de Técnicas de Optimización	Grado de Flexibilidad						Conformidad con los resultados					
				0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Programa maestro de producción															
Planeación de los requerimientos de materiales															
Planeación de los requerimientos de capacidad															
Secuenciación de trabajos															
Control de producción															

6. Cómo califica Usted la competitividad de la empresa en cuanto a las siguientes variables, donde 0 es la calificación más baja y 5 es la calificación más alta:

VARIABLE	CALIFICACIÓN					
	0	1	2	3	4	5
Cumplimiento de fechas de entrega						
Bajos costos de producción						
Bajo tiempo de respuesta a requerimientos de clientes						
Alta calidad de los productos						

B. Anexo: Relación cuestionario con diseño metodológico de tesis

1. Objetivos vs cuestionario:

El primer objetivo específico dice:

"Evaluar el estado actual de la función de producción en las empresas colombianas fabricantes de tejidos técnicos, para definir de la forma más completa posible las situaciones a considerar en la programación de producción en este tipo de industrias."

Allí, en forma general se define lo que se quiere alcanzar con la encuesta, y por lo tanto tiene relación con la encuesta en su totalidad, incluidas todas sus preguntas

El segundo objetivo específico dice:

"Explorar, mediante una investigación bibliográfica, las diferentes técnicas propuestas a nivel internacional para la programación de la producción aplicables al modelo de flujo de la industria textil."

Una conclusión que se obtuvo en la investigación bibliográfica para estado del arte dice:

"los trabajos revisados… presentan deficiencias en la consideración de las dificultades propias de los entornos productivos reales. Si definimos las siguiente ocho características deseables para modelar un entorno realista: Máquinas paralelas no idénticas o no relacionadas, lotes de transferencia, tiempos de montaje dependientes de la secuencia, maleabilidad, entrada dinámica, 3 o más etapas, función objetivo relacionada con fecha de entrega o costo y, datos de entornos reales; sólo 2 trabajos (el 5%) cumplen simultáneamente con 4 características; 9 artículos (21%) cumplen con 3; 15 documentos (35%) cumplen con 2; 12 papers (28%) con 1 y 5 (12%) no cumplen ninguna. De allí que se confirme lo enunciado en la situación problema acerca de la necesidad de modelar el flow shop híbrido de la forma más completa posible; teniendo en cuenta la mayoría de las condiciones reales de la producción. En particular, en este estudio, las que caracterizan a la producción textil."

Las cinco primeras características mencionadas se evalúan en la pregunta 4 de la encuesta, la 6ª (etapas múltiples) se validó al seleccionar las empresas considerando que tuvieran integración vertical hacia atrás o hacia adelante, lo que implica más de una etapa. La séptima (la función objetivo) se evalúa en la preguntas 1, 2, 3 y 6. La octava (datos de entornos reales) se dan por descontados al tratar con empresas que enfrentan el problema real cotidianamente y no entornos simulados como los artículos consultados en la bibliografía.

El tercer objetivo específico es:

"Plantear un modelo metodológico para la programación de la producción en las industrias del sector textil que considere la mayor variedad posible de situaciones del mundo real, basado en el estado actual y el inventario de técnicas propuestas a nivel internacional".

La pregunta 4, nuevamente, está ayudando a validar las situaciones del mundo real basadas en el estado actual de la industria.

El cuarto objetivo específico es:

"Comparar, mediante técnicas estadísticas los resultados de la aplicación de la metodología producto de esta investigación, frente a otras alternativas de programación de la producción de la industria textil, buscando determinar la efectividad de la solución propuesta".

Las técnicas estadísticas se emplearían para comparar el resultado de la investigación con las alternativas de la programación de producción que se ven en la realidad y que se consultan en la pregunta 5, mientras que su efectividad o impacto en las variables de interés se mide en la pregunta 6.

2. Variables vs cuestionario:

En la definición de variables se plantearon las siguientes variables dependientes:

"Tiempo total de procesamiento.

Tardanza / anticipación (Diferencia entre fecha de entrega pactada y fecha de entrega real).

Inventario en proceso (Unidades de producto en proceso promedio en las máquinas/procesos)."

Incluso en el examen de calificación los jurados sugirieron tener en cuenta también el costo.

El título del trabajo le apunta a la segunda de esas variables, pues se centra en mejorar los tiempos de entrega. En la pregunta 1 de la encuesta se evalúa la importancia para cada empresa de esas variables dependientes al momento de programar su producción. En la pregunta 2, se puede verificar la importancia para la empresa, en especial de la tercera de las variables (inventario en proceso) frente a decisiones de capacidad. En la pregunta 3 se evalúa la variable que se investiga en el proyecto (tiempo de entrega) al preguntar sobre el grado de cumplimiento de la empresa de esas variables. En la pregunta 6 se evalúa la competitividad de la empresa en relación con esas variables.

En la operacionalización de las variables se lee:

"*La función objetivo usualmente minimiza una variable relacionada con el tiempo, como el makespan (máximo tiempo total de procesamiento de un pedido), la tardanza (retraso con respecto a la fecha de entrega pactada), anticipación (adelanto respecto a la fecha de entrega pactada). Se conocen trabajos donde se minimiza el tiempo medio de flujo o el tiempo de terminación del último producto.*

Algunos investigadores han trabajado minimizando el inventario de producto en proceso.

El modelo puede ser incluso multi-objetivo, dado que finalmente la empresa busca bajar sus costos y aumentar su capacidad. Muchas veces los objetivos de la empresa son contradictorios entre sí, lo que implica modelar la prioridad de los objetivos según el direccionamiento estratégico de la organización.

La variable a minimizar (o maximizar) se supone que es función de la programación de la producción (por pedido, producto, máquina/proceso y unidad de tiempo), de las condiciones comerciales pactadas en el pedido (cantidades, referencias, fechas de entrega) y de las situaciones que se presenten en la ejecución del programa (diferencias en capacidad, eficiencia, disponibilidad de los recursos), independientemente de que se hayan modelado o no en la programación."

En las preguntas sobre las variables (1, 2, 3 y 6) se hace referencia a lo mencionado en los 4 primeros párrafos de la cita precedente. Lo que se menciona en el cuarto párrafo está evaluado en las preguntas 4 y 5 que hacen referencia a las particularidades de la programación y a las herramientas empleadas en la actualidad.

3. Hipótesis y Justificación vs cuestionario:

La Hipótesis general de la investigación es:

"Por medio de una metodología de programación de la producción para las empresas textiles, adecuada específicamente a las características de sus procesos, que considere todo el proceso productivo y que aplique técnicas inteligentes; es posible mejorar los tiempos de entrega en la industria colombiana de tejidos técnicos."

La variable dependiente de mayor interés (aparece en el título, en el objetivo general y en la hipótesis) es: tiempos de entrega. La encuesta valida su importancia para cada empresa en la pregunta 1, su estado actual en la pregunta 3 y su auto-valoración relativa en la pregunta 6.

En la justificación se afirma:

"… la administración de la producción también tiene dificultades propias, debido a: bajo nivel de innovación en productos y procesos, falta de sistemas integrados de información

y, producción sin tener en cuenta parámetros de eficiencia o ineficiencia. (Cidetexco, 2003), (Van der Bruggen, 1999).

Algunas empresas del sector han hecho altas inversiones en los últimos años en Sistemas de Información e implementación de herramientas ERP (McKinsey & Company, 2009). Aunque estas herramientas pueden mejorar el desempeño de las empresas y la toma de decisiones (Escorcia & Duque, 2005), presentan desventajas que desestimulan su generalización (Aguilar, 2009). Su papel, además es la gestión de recursos a nivel táctico y el control de ejecución, más que la programación. Las estrategias de optimización de la programación no están consideradas en el estándar de este tipo de sistemas. (Harjunkoski et al, 2009). Valga anotar además que, en general, las tecnologías de información para la planificación y control de producción, están aún poco implantadas en el sector. (Salinas, 2004)."

Por esa razón se diseñó la pregunta 5 para verificar la utilización de herramientas tecnológicas en la programación de producción y se valida su utilidad en preguntas como la 3 y la 6 que califican los resultados de la empresa con el modelo que aplica para planear su producción.

En resumen podemos compilar el diseño del cuestionario y su relación con el diseño de la investigación de la siguiente forma:

PREGUNTA	VARIABLE	OBJETIVO	HIPÓTESIS /JUSTIFICACIÓN
1. CRITERIO	Makespan, entrega, inventario, costo	1:Trabajo de campo y 2:Estado del arte	HIPÓTESIS
2. ESTRATEGIA	Inventario, costo	1:Trabajo de campo y 2:Estado del arte	
3. CUMPLIMIENTO	Entrega,	1:Trabajo de campo y 2:Estado del arte	HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN
4. CARACTERÍSTICAS	Operacionalización	1:Trabajo de campo, 2:Estado del arte,	

		3:Modelo matemático	
5. HERRAMIENTAS	Operacionalización	1:Trabajo de campo y 4:Evaluación	JUSTIFICACIÓN
6. CALIFICACIÓN	Makespan, entrega, inventario, costo	1:Trabajo de campo, 2:Estado del arte y 4:Evaluación	HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN

C. Anexo: Resultados Encuesta

Estado actual de la Programación de la Producción en las empresas Colombianas fabricantes de Tejidos Técnicos

La industria de Tejidos Técnicos en Colombia está compuesta por unas cuantas empresas, de tamaño mediano, concentrada principalmente en las dos mayores áreas metropolitanas: Bogotá y Medellín, con excepción de una en el eje cafetero.

Aunque muchas empresas del sector textil tienen en su configuración comercial una división llamada de tejidos técnicos, en muchas de ellas esa área se dedica a la comercialización de tejidos con usos como tapicería o forros para asientos de vehículos y otros productos similares a los tejidos para fabricar prendas de vestir donde prima la estética sobre la funcionalidad. En este estudio nos hemos concentrado en aquellas empresas que producen tejidos de uso industrial definidos más por características técnicas referentes a sus propiedades físicas y químicas que por su apariencia exterior. Se consideraron empresas que fabrican productos en el sistema de tejido plano con algún grado de integración vertical (más de una etapa del proceso de fabricación, incluido el tisaje o tejeduría), de tal forma que su configuración pudiera catalogarse como un flow shop híbrido flexible.

El proceso de tejidos técnicos difiere del de las telas destinadas a la fabricación de prendas de vestir dado que los tamaños de lote son generalmente variables y de dimensiones mayores al estándar de la “pieza” o “rollo” acostumbrado en las telas con destino a la confección. También difiere en las materias primas, que generalmente son fibras sintéticas en filamentos continuos a diferencia de la hilaza spun, proveniente de fibras naturales y artificiales, propia de la mayoría de las telas para la fabricación de ropa.

De igual manera, por ser tejidos de uso específico, generalmente los tejidos técnicos se fabrican casi exclusivamente bajo pedido, y con diseños diferentes para cada cliente.

Estas diferencias hacen que el proceso y la programación y planeación de la producción de los tejidos técnicos tengan una dinámica diferente, donde los tamaños de lote añaden complejidad, la fabricación bajo pedido implica mayor importancia del cumplimiento de fechas de entrega y la exclusividad de los diseños genera exigencias mayores en la planeación de los inventarios.

Algunos de los productos que se elaboran en Colombia en la categoría de Tejidos Técnicos son: Lonas para carpas, bases para bandas transportadoras, geotextiles para prevenir la erosión, telas de alta resistencia para blindajes y protección anti-balas, telas para la fabricación de llantas, y telas para plastificación, entre otros.

La mayor parte del mercado de esos productos está en el exterior, por lo que el subsector tiene importante participación en las exportaciones de textiles, en especial al mercado andino y latinoamericano.

Para la investigación presente, se contactaron siete empresas que fabrican tejidos técnicos. De las siete, una fue eliminada por no cumplir con los supuestos básicos de pertenecer al sector, dado que no trabaja en el sistema de tejido plano, no tiene integración vertical (solo tiene tisaje) y en sus productos prima lo estético sobre lo funcional.

Las otras seis empresas fueron contactadas tanto por teléfono, correo electrónico y en forma presencial. 2 de ellas no respondieron, una respondió que no podían revelar la información solicitada y las tres restantes suministraron la información que se resume en el presente texto.

Se aplicó una encuesta para evaluar la función de programación de producción en cuanto a sus variables y las herramientas utilizadas.

1. Principales criterios para programar (Calificación sobre 5)

Aunque los puntajes fueron muy parejos, se priorizaron el tiempo de procesamiento y el costo de fabricación sobre el retraso o anticipo en tiempo de entrega y el inventario en proceso.

Criterio	Promedio	Desviación
Tiempo procesamiento	4,33	0,58
Costo Fabricación	4,33	1,15
Retraso/Anticipación Entrega	4,00	1,00
Inventario en Proceso	4,00	1,00

2. Política general de programación

Variable	Porcentaje
Equilibrio entre uso de recursos y cumplir demanda	66,67%
Cumplir con la demanda minimizando inventario aun a costa de inestabilidad en el uso de los recursos	33,33%

La mayoría de las empresas interrogadas busca un equilibrio entre el aprovechamiento de los recursos productivos y el cumplimiento de sus compromisos con los clientes. En segundo lugar se considera el cumplimiento de la demanda con un mínimo de inventarios a pesar de que se cause inestabilidad en el uso de los recursos, en especial de la mano de obra.

3. Cumplimiento de fechas de entrega

Cumplimiento	Porcentaje
La mayoría de las veces se cumple	66,67%
En muy contadas ocasiones no se cumple	33,33%

Para la mayoría de las empresas las fechas de entrega se cumplen la mayoría de las veces (2/3) o incluso casi todas las veces (1/3).

4. Importancia de las fuentes de perturbación (Calificación sobre 5)

Situación	Promedio	Desviación
Máquinas paralelas no idénticas	4,33	1,15
Tamaño de lote variable entre etapas	4,33	1,15
Tiempo de montaje depende de secuencia	4,00	1,00
Maleabilidad de lotes	4,00	1,00
Entrada dinámica	4,00	1,00

De las posibles situaciones que dificultan la programación de la producción en el flow shop híbrido flexible textil de los tejidos técnicos, las que se consideran más perturbadoras son el paralelismo entre máquinas no relacionadas o no idénticas y el tamaño de lote variable entre etapas. La calificación, no obstante, es muy pareja, y de cerca se consideran también importantes los tiempos de montaje dependientes de la secuencia, la maleabilidad de los lotes y la entrada dinámica de pedidos.

5. Herramientas informáticas utilizadas

Parte del proceso	Excel	Desarrollo Propio	Ninguno
Programa Maestro	66,67%	33,33%	0,00%
MRP	33,33%	33,33%	33,33%
CRP	33,33%	33,33%	33,33%
Secuenciación	33,33%	33,33%	33,33%
Control	0,00%	66,67%	33,33%

6. Flexibilidad de Herramientas Informáticas (Calificación sobre 5)

Parte del proceso	Promedio	Desviación
Programa Maestro	2,00	1,41
MRP	2,00	1,41
CRP	2,00	1,41
Secuenciación	2,00	1,41
Control	4,00	1,41

2/3 de las empresas usan en la mayor parte de sus procesos de programación de producción la hoja de Cálculo Excel. La calificación que le dan a flexibilidad de sus

herramientas es baja (2/5). 1/3 de las empresas tiene un erp propio diseñado a la medida, que incluye algunas de las soluciones presentadas en este trabajo. Esa empresa no contestó esta parte de la encuesta. 2/3 de las empresas tiene una herramienta propia para el control de tiempos de máquinas y la considera suficientemente flexible.

7. Grado de Satisfacción con Herramientas Informáticas (Calificación sobre 5):

Parte del proceso	Promedio	Desviación
Programa Maestro	3,00	1,41
MRP	2,00	0,00
CRP	2,00	0,00
Secuenciación	2,00	0,00
Control	5,00	0,00

De las empresas que contestaron esta parte de la encuesta, se encontró satisfacción en los resultados en grado medio con el programa maestro y en alto grado con las herramientas de control (desarrolladas a la medida). En el resto de las etapas se ve insatisfacción con los resultados. En esas etapas predomina el uso de la hoja de cálculo Excel.

8. Competitividad (Calificación sobre 5):

Factor	Promedio	Desviación
Calidad de los productos	4,67	0,58
Cumplimento Entregas	4,33	0.58
Bajo Costo de Producción	4,00	1,00
Bajo Tiempo de respuesta	4,00	1,00

Las empresas se consideran altamente competitivas en especial en lo que tiene que ver con la calidad de los productos y el cumplimiento de las entregas. Hay una menor percepción de competitividad en cuando a costos y tiempos de respuesta.

D. Anexo: Resumen revisión bibliográfica programación de producción en entornos relacionados con industria de tejidos técnicos

La Tabla 7-1 resume los resultados detallados de la revisión de literatura. Inicia con un consecutivo, luego tiene la cita bibliográfica de cada artículo analizado, una columna que indica si el trabajo corresponde al sector textil y tres grupos de columnas, una para el tipo de problema tratado en el artículo, otro grupo para los algoritmos de solución aplicados y un tercer grupo para las funciones objetivo evaluadas en cada uno de los trabajos. Las opciones no son mutuamente excluyentes dado que se encontraron trabajos que utilizan más de un algoritmo de solución o consideran más de una función objetivo.

Tabla 7-1: Análisis de Literatura sobre el tema de secuenciación en entornos afines a la producción de tejidos técnicos

			TIPOS DE PROBLEMA						ALGORITMOS DE SOLUCIÓN					FUNCIÓNES OBJETIVO			
No	AUTORES, AÑO	INDUSTRIA TEXTIL	*FLOW SHOP* HÍBRIDO FLEXIBLE (HFFS)	*FLOW SHOP* HÍBRIDO (HFS)	OTROS *FLOW SHOP*	MÁQUINAS PARALELAS	UNA SOLA MÁQUINA	OTROS PROBLEMAS	GENÉTICO	OTRA METAHEURÍSTICA	HEURÍSTICA	LP / BRANCH AND BOUND	OTROS ALGORITMOS	*MAKESPAN*/TIEMPO PROCESO	TARDANZA/FECHA ENTREGA	COSTOS	OTROS OBJETIVOS
1	(Cui & Gu, 2015)			X						X				X			
2	(J. Li et al., 2015)		X							X					X		
3	(J. T. Lin & Chen, 2015)			X									X	X			

No	AUTORES, AÑO	INDUSTRIA TEXTIL	TIPOS DE PROBLEMA						ALGORITMOS DE SOLUCIÓN					FUNCIÓNES OBJETIVO			
			FLOW SHOP HÍBRIDO FLEXIBLE (HFFS)	*FLOW SHOP* HÍBRIDO (HFS)	OTROS *FLOW SHOP*	MÁQUINAS PARALELAS	UNA SOLA MÁQUINA	OTROS PROBLEMAS	GENÉTICO	OTRA METAHEURÍSTICA	HEURÍSTICA	iLP / BRANCH AND BOUND	OTROS ALGORITMOS	*MAKESPAN*/TIEMPO PROCESO	TARDANZA/FECHA ENTREGA	COSTOS	OTROS OBJETIVOS
4	(Zandieh & Hashemi, 2015)		X						X					X			
5	(Sangsawang, Sethanan, Fujimoto, & Gen, 2015)				X					X				X			
6	(Rabiee, Sadeghi Rad, Mazinani, & Shafaei, 2014)				X					X				X			
7	(Mirabi, 2014)				X				X					X			
8	(Sioud et al., 2014a)		X							X				X			
9	(Sioud et al., 2014b)		X							X				X			
10	(Sioud et al., 2014c)		X							X			X		X		
11	(Attar, Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam, et al., 2013)		X							X				X			
12	(Attar, Mohammadi, & Tavakkoli-Moghaddam, 2013)		X							X				X	X		
13	(De Siqueira et al., 2013)		X							X				X			
14	(Sioud et al., 2013)		X						X					X			
15	(Torabi, Sahebjamnia, Mansouri, & Bajestani, 2013)					X				X				X	X		X
16	(Van Vreckem, Borodin, De Bruyn, & Nowé, 2013)		X							X				X			
17	(Xu, Wang, Wang, & Liu, 2013)			X									X	X			
18	(Bozorgirad & Logendran, 2013)			X								X		X		X	X
19	(Carpov, Carlier, Nace, & Sirdey, 2012)			X							X			X			
20	(De Siqueira, de Souza, & Souza, 2012)		X							X					X		
21	(F. Defersha & Chen, 2012)		X						X					X			
22	(Gicquel, Hege, Minoux, Canneyt, & van Canneyt, 2012)			X								X			X		
23	(Kis & Kovács, 2012)					X				X		X		X	X	X	
24	(Q.-K. Pan & Ruiz, 2012)	X			X						X			X			
25	(Sadykov, 2012)	X				X			X					X			
26	(Yao, Zhao, & Zhang, 2012)				X						X			X			
27	(X. Zhang & van de Velde, 2012)				X				X					X			
28	(Ángel-bello, Álvarez, Pacheco, & Martínez, 2011a)							X		X				X			
29	(Ángel-bello, Álvarez, Pacheco, & Martínez, 2011b)						X				X			X			
30	(Bollapragada, Della, & Ghirardi, 2011)	X						X			X			X			
31	(Cevikcan, Durmusoglu, & Baskak, 2011)					X							X	X			
32	(P.-C. Chang & Chen, 2011)					X			X					X			
33	(Cheng, Cheng, Wu, Hsu, & Wu, 2011)							X		X		X		X			
34	(Cheng, Hsu, Huang, & Lee, 2011)						X					X		X	X		
35	(Cho, Bae, Kim, & Jeong, 2011)			X					X					X	X		
36	(H. Choi, Kim, & Lee, 2011)			X									X				X
37	(Choong, Phon-Amnuaisuk, & Alias, 2011)			X							X			X			
38	(F. Defersha, 2011)		X						X					X			
39	(Driessel & Mönch, 2011)					X				X					X		
40	(Engin, Ceran, & Yilmaz, 2011)			X					X					X			
41	(Han, Shi, Qiao, & Yue, 2011)			X									X		X		
42	(Hekmatfar, Fatemi Ghomi, & Karimi, 2011)			X					X					X			
43	(Hidri & Haouari, 2011)			X							X			X			
44	(Abir Ben Hmida, Haouari, Huguet, & Lopez, 2011)							X			X			X			
45	(James & Almada-lobo, 2011)					X				X		X		X		X	
46	(W. Lee, Lin, & Shiau, 2011)						X			X		X					X
47	(S. Lin, Lee, Ying, & Lu, 2011)					X				X					X		
48	(Lu, Ng, & Zhang, 2011)						X						X	X			
49	(Mahdavi, Komaki, & Kayvanfar, 2011)			X						X		X		X			
50	(Mirsanei, Zandieh, Moayed, & Khabbazi, 2011)			X		X				X				X			
51	(Qiao & Sun, 2011)			X						X				X			
52	(Safari & Sadjadi, 2011)				X				X					X			
53	(Sarıçiçek & Çelik, 2011)					X				X					X		

No	AUTORES, AÑO	INDUSTRIA TEXTIL	TIPOS DE PROBLEMA						ALGORITMOS DE SOLUCIÓN					FUNCIÓNES OBJETIVO			
			FLOW SHOP HÍBRIDO FLEXIBLE (HFFS)	*FLOW SHOP* HÍBRIDO (HFS)	OTROS *FLOW SHOP*	MÁQUINAS PARALELAS	UNA SOLA MÁQUINA	OTROS PROBLEMAS	GENÉTICO	OTRA METAHEURÍSTICA	HEURÍSTICA	iLP / BRANCH AND BOUND	OTROS ALGORITMOS	*MAKESPAN*/TIEMPO PROCESO	TARDANZA/FECHA ENTREGA	COSTOS	OTROS OBJETIVOS
54	(Shah & Ierapetritou, 2011)							X					X			X	
55	(Taylor, Taj, Nedeltcheva, Pfeil, & Roumaya, n.d.)							X					X				X
56	(Vallada & Ruiz, 2011)							X	X			X		X			
57	(W. Weng & Fujimura, 2012)			X									X	X			
58	(Qi & Ã, 2011)				X						X			X			
59	(Yalaoui et al., 2011)		X						X						X		
60	(J. Yang, 2011)			X							X			X			
61	(S. Yang, Ma, Xu, & Yang, 2011)						X					X		X			
62	(Yue-wen, Feng-xing, Xiao-hong, Qing-zhu, & Jia-hua, 2011)	X		X						X				X			
63	(Aryanezhad, Talebi, & Karimi-nasab, 2010)				X						X					X	
64	(Azadeh, Ghaderi, Dehghanbaghi, & Dabbaghi, 2010)	X						X					X	X	X		
65	(Behnamian, Fatemi Ghomi, & Zandieh, 2010)			X						X					X		
66	(Chyu & Chang, 2010)	X				X			X					X	X		
67	(F. M. Defersha & Chen, 2010)				X				X					X			
68	(M. Rocha, Paula, Robson, & Gómez, 2010)					X							X		X		
69	(Dugardin, Yalaoui, & Amodeo, 2010)	X		X					X					X			
70	(Fattahi, Tavakoli, Jalilvand-Nejad, & Jolai, 2010)							X		X		X					X
71	(Gacias, Artigues, & Lopez, 2010)					X					X	X		X	X		
72	(J. Gao, 2010)	X				X							X	X	X		
73	(Hentous & Merabti, 2010)				X						X	X		X			
74	(F Jin, Gupta, Song, & Wu, 2010)						X			X					X		
75	(Kahraman, Engin, Kaya, & Elif Öztürk, 2010)			X									X	X			
76	(Karimi et al., 2010)		X						X					X	X		
77	(Khalouli, Ghedjati, Hamzaoui, & Ã, 2010)			X						X					X		
78	(Lian, 2010)					X				X				X	X		
79	(B. Liu, Wang, Liu, Qian, & Jin, 2010)				X					X				X			
80	(A. Liu, Yin, & Jiang, 2010)				X								X	X			
81	(Morais & Moccellin, 2010)	X		X							X			X			
82	(Naderi, Ruiz, et al., 2010)		X							X				X			
83	(Naderi, Tavakkoli-Moghaddam, & Khalili, 2010)				X					X				X	X		
84	(Noorul Haq, Ramanan, Shashikant, & Sridharan, 2010)				X				X					X			
85	(Omar, Teo, & Suppiah, 2010)			X								X					X
86	(Ozgur & Bai, 2010)	X					X				X			X			
87	(Q. Pan, Duan, Liang, Gao, & Li, 2010)				X								X	X			
88	(Rebaine, 2010)				X					X				X			
89	(Lixin Tang & Wang, 2011)							X					X	X			
90	(J. Tang, Zhang, & Lin, 2010)	X			X				X					X			
91	(Uhlig & Rose, 2010)							X	X					X			
92	(Urlings et al., 2010)		X						X					X			
93	(Yalaoui et al., 2010)		X										X		X		
94	(Yen-Wen, Chen-Hao, & Chin-Yuan, 2010)				X						X			X	X		
95	(Ying & Cheng, 2010)					X				X					X		
96	(Zandieh et al., 2010)		X						X					X			
97	(Zandieh & Karimi, 2010)		X						X					X	X		
98	(Zandieh & Karimi, 2011)			X					X					X	X		
99	(Song-yan, 2010)				X				X					X			
100	(C. Zhang, Ning, & Ouyang, 2010)				X								X	X			
101	(Zhao & Tang, 2010)				X								X	X			
102	(Zheng & Yamashiro, 2010)				X				X					X			
103	(Zhou & Lu, 2010)			X							X			X			
104	(Álvarez Martínez, Ocampo, Mirledy, & Gallego Rendón, 2009)				X					X				X			

			TIPOS DE PROBLEMA						ALGORITMOS DE SOLUCIÓN					FUNCIÓNES OBJETIVO			
No	AUTORES, AÑO	INDUSTRIA TEXTIL	*FLOW SHOP* HÍBRIDO FLEXIBLE (HFFS)	*FLOW SHOP* HÍBRIDO (HFS)	OTROS *FLOW SHOP*	MÁQUINAS PARALELAS	UNA SOLA MÁQUINA	OTROS PROBLEMAS	GENÉTICO	OTRA METAHEURÍSTICA	HEURÍSTICA	iLP / BRANCH AND BOUND	OTROS ALGORITMOS	*MAKESPAN*/TIEMPO PROCESO	TARDANZA/FECHA ENTREGA	COSTOS	OTROS OBJETIVOS
105	(Amin-Naseri & Beheshti-Nia, 2009)	X		X		X			X					X			
106	(Ang, Iyer, & Qi, 2009)						X						X	X	X		
107	(Arroyo, Nunes, & Kamke, 2009)						X			X							X
108	(Behnamian, Zandieh, & Ghomi, 2009)					X				X				X			
109	(P. Chang, Chen, & Fan, 2009)						X			X					X		
110	(W. J. Chen, 2009)	X						X			X			X			
111	(S. Choi & Kim, 2009)				X						X	X			X		
112	(H.-S. Choi & Lee, 2009)	X		X								X					X
113	(Dugardin, Amodeo, & Yalaoui, 2009)			X					X						X		
114	(Fang, 2009)	X				X			X					X	X		
115	(Feng, Lu, & Li, 2009)			X					X					X			
116	(Ribeiro, de Souza, & Souza, 2009)						X		X						X		
117	(Figielska, 2009)	X			X				X					X			
118	(Gharehgozli, Tavakkoli-Moghaddam, & Zaerpour, 2009)					X						X		X	X		
119	(Gholami, Zandieh, & Alem-Tabriz, 2009)			X					X					X			
120	(Harjunkoski et al., 2009)							X					X				X
121	(Hojjati & Sahraeyan, 2009)			X									X	X			
122	(Hsu, Hsiung, Chen, & Wu, 2009)	X						X	X			X			X		
123	(Jabbarizadeh et al., 2009)		X						X					X			
124	(Feng Jin, Song, & Wu, 2009)						X			X					X		
125	(Jouglet, Oğuz, & Sevaux, 2009)	X		X									X	X			
126	(Jungwattanakit, Reodecha, Chaovalitwongse, & Werner, 2009)				X						X			X			
127	(Kalczynski & Kamburowski, 2009)				X						X			X			
128	(H. W. Kim & Lee, 2009)			X		X					X			X	X		
129	(Kovács, Brown, & Tarim, 2009)						X					X				X	
130	(Ling-li, Feng-xing, Xiao-hong, & Zheng, 2009)			X						X							X
131	(Lipi, Hasin, & Noor-E-Alam, 2009)			X									X				X
132	(Madhushini, Rajendran, & Deepa, 2009)				X							X		X	X		
133	(Maravelias & Sung, 2009)							X					X	X		X	
134	(Ng, Matsveichuk, Sotskov, & Cheng, 2009)				X								X	X			
135	(Pesch & Sterna, 2009)				X				X								X
136	(Bin Qian, Wang, Huang, Wang, & Wang, 2009)				X								X	X			
137	(B Qian, Wang, Hu, Huang, & Wang, 2009)				X								X	X			
138	(Rajkumar & Shahabudeen, 2009)				X				X					X			
139	(Ruiz, 2009)			X						X				X			
140	(Solano Charris, 2009)		X							X				X			
141	(Montoya-torres & Paternina-arboleda, 2009)	X			X					X				X			
142	(Su & Li, 2009)			X					X					X			
143	(Tavakkoli-moghaddam, Taheri, Bazzazi, Izadi, & Sassani, 2009)					X			X					X			
144	(Xie & Tang, 2009)			X							X			X			
145	(Yaurima, Burtseva, & Tchernykh, 2009)	X		X					X					X			
146	(Yuan, Sauer, & Sauvey, 2009)			X								X		X			
147	(Z. Li & Ierapetritou, 2009)							X					X			X	
148	(Allahverdi, Ng, Cheng, & Kovalyov, 2008)							X	X					X		X	
149	(Martínez, Ocampo, & Rendón, 2009)				X					X				X			
150	(Zandieh, Dorri, et al., 2009)		X						X					X			
151	(Beraldi, Ghiani, Grieco, & Guerriero, 2008)	X				X					X			X		X	
152	(Pierpaolo Caricato, Grieco, & Nucci, 2008)			X									X	X			
153	(Figielska, 2008)				X						X			X			
154	(J. Gao, He, Wang, & Liu, 2008)	X				X			X					X			

No	AUTORES, AÑO	INDUSTRIA TEXTIL	TIPOS DE PROBLEMA						ALGORITMOS DE SOLUCIÓN					FUNCIÓNES OBJETIVO			
			FLOW SHOP HÍBRIDO FLEXIBLE (HFFS)	*FLOW SHOP* HÍBRIDO (HFS)	OTROS *FLOW SHOP*	MÁQUINAS PARALELAS	UNA SOLA MÁQUINA	OTROS PROBLEMAS	GENÉTICO	OTRA METAHEURÍSTICA	HEURÍSTICA	iLP / BRANCH AND BOUND	OTROS ALGORITMOS	*MAKESPAN*/TIEMPO PROCESO	TARDANZA/FECHA ENTREGA	COSTOS	OTROS OBJETIVOS
155	(J. Gao, He, & Wang, 2008a)	X				X			X					X			
156	(J. Gao, He, & Wang, 2008b)					X			X					X	X		
157	(Guo, Wong, Leung, Fan, & Chan, 2008)							X	X						X		
158	(Karabuk, 2008)	X						X				X				X	
159	(Khalouli, Ghedjati, & Hamzaoui, 2008)			X						X					X	X	
160	(X. Liu, Zou, & Zhang, 2008)			X					X			X					X
161	(Mahdavi, Mojarad, Javadi, & Tajdin, 2008)			X					X					X	X		
162	(Pfund, Fowler, Gadkari, & Chen, 2008)					X							X		X		
163	(P. L. Rocha, Ravetti, Mateus, & Pardalos, 2008)					X				X		X		X	X		
164	(Rodrigues & Gómez, 2008)							X		X				X			
165	(Ruiz et al., 2008)		X								X	X		X			
166	(Sbihi & Varnier, 2008)						X				X	X			X		
167	(Shao et al., 2008)					X							X	X			
168	(Solano Charris, 2009)			X						X				X			
169	(Vargas Nieto & Montoya Torres, 2008)				X				X					X			
170	(Yagmahan & Yenisey, 2008)				X					X				X			
171	(Zhan & Qiu, 2008)			X					X					X			
172	(Armentano & de Franca Filho, 2007)					X				X							X
173	(Bowers & Agarwal, 2007)							X			X						X
174	(P. Caricato, Grieco, & Serino, 2007)			X							X			X			
175	(W. J. Chen, 2007)	X						X			X	X			X		
176	(S.-W. Choi & Kim, 2007)				X						X	X		X			
177	(Figielska, 2007)				X						X			X			
178	(C. Gao & Tang, 2007)			X		X				X							X
179	(Gómez, 2007)			X					X					X			
180	(Janiak, Kozan, Lichtenstein, & Oğuz, 2007)			X						X				X	X	X	
181	(Jenabi, Fatemi Ghomi, Torabi, & Karimi, 2007)					X			X					X		X	
182	(Koulamas & Kyparisis, 2007)					X					X			X			
183	(C.-J. Liao & Juan, 2007)						X			X					X		
184	(Logendran, Mcdonell, & Smucker, 2007)					X				X					X		
185	(Moccellin & Nagano, 2007)							X			X			X			
186	(Lopes & de Carvalho, 2007)					X						X			X		
187	(Quadt & Kuhn, 2007)							X					X				X
188	(Solari & Ocampo, 2007)							X	X					X			
189	(Yandra & Tamura, 2007)							X	X					X			
190	(Taner, Hodgson, King, & Schultz, 2007)							X			X				X		
191	(Vishwanathan, Kulkarni, Pachamuthu, Santos, & Damodaran, 2007)	X		X							X			X			
192	(Voß & Witt, 2007)	X			X						X				X		
193	(M Hossein Fazel Zarandi, Esmaeilian, & Zarandi, 2007)	X						X	X								X
194	(Hamid Allaoui & Artiba, 2006)				X		X				X	X		X			
195	(H Allaoui, Lamouri, & Lebbar, 2006)			X									X	X			
196	(Andrés, Gomez, & Garcia-Sabater, 2006)			X							X			X			
197	(Ballesteros Silva, Ballesteros Riveros, & Bernal Loaiza, 2006)					X					X			X			
198	(Beraldi, Ghiani, Guerriero, & Grieco, 2006)	X				X					X					X	
199	(Berkoune, Mesghouni, & Rabenasolo, 2006)							X	X					X		X	
200	(P. Chen, Wu, & Lee, 2006)							X			X	X			X		
201	(Choobineh, Mohebbi, & Khoo, 2006)						X			X					X		
202	(Ferretti, Zanoni, & Zavanella, 2006)							X		X				X		X	
203	(S. R. Gupta & Smith, 2006)						X			X					X		
204	(Haouari, Hidri, & Gharbi, 2006)			X								X		X			

			TIPOS DE PROBLEMA						ALGORITMOS DE SOLUCIÓN					FUNCIÓNES OBJETIVO			
No	AUTORES, AÑO	INDUSTRIA TEXTIL	*FLOW SHOP* HÍBRIDO FLEXIBLE (HFFS)	*FLOW SHOP* HÍBRIDO (HFS)	OTROS *FLOW SHOP*	MÁQUINAS PARALELAS	UNA SOLA MÁQUINA	OTROS PROBLEMAS	GENÉTICO	OTRA METAHEURÍSTICA	HEURÍSTICA	iLP / BRANCH AND BOUND	OTROS ALGORITMOS	*MAKESPAN*/TIEMPO PROCESO	TARDANZA/FECHA ENTREGA	COSTOS	OTROS OBJETIVOS
205	(Hentous & Benhammadi, 2006)			X							X			X			
206	(A Ben Hmida, Huguet, Lopez, & Haouari, 2006)			X							X			X			
207	(Hu, Ma, & Ye, 2006)			X					X					X			
208	(Huang & Wang, 2006)							X					X	X			
209	(Martin, 2009)							X	X					X			
210	(Min & Cheng, 2006)	X				X			X						X		
211	(Muñoz, Moraga, & Baesler, 2005)					X					X			X			
212	(Rabadi, Moraga, & Al-Salem, 2006)					X							X	X			
213	(Feng Jin, Gupta, Song, & Wu, 2010)						X			X					X		
214	(Ruiz & Maroto, 2006)			X					X								X
215	(Silva & Magalhaes, 2006)	X				X					X				X		
216	(Tahar, Yalaoui, Chu, & Amodeo, 2006)					X					X			X			
217	(L Tang & Xuan, 2006)			X									X	X			
218	(Toro Ocampo, Restrepo Grisales, & Granada Echeverri, 2006)				X				X					X			
219	(Toro Ocampo, Granada Echeverri, & Restrepo Grisales, 2006)				X					X				X			
220	(Yanai & Fujie, 2006)							X				X		X			
221	(Zandieh, Fatemi Ghomi, & Moattar Husseini, 2006)i	X		X									X	X			
222	(Anglani, Grieco, Guerriero, & Musmanno, 2005)	X				X							X				X
223	(W.-J. Chen & Liao, 2005)	X						X					X				X
224	(Companys & D'Armas, 2005)							X			X						X
225	(Gómez Gasquet & García Sabater, 2005)							X		X							X
226	(Gómez Gasquet, García Sabater, & Romano, 2005)							X		X							X
227	(Lalas, Mourtzis, Papakostas, & Chryssolouris, 2005)	X						X					X	X			
228	(Mauguière, Billaut, & Bouquard, 2005)						X					X		X			
229	(Oğuz & Ercan, 2005)			X					X					X			
230	(Lixin Tang, Liu, & Liu, 2005)			X									X	X			
231	(Vazquez Rodriguez & Salhi, 2005)				X				X					X	X		
232	(Wang & Xia, 2005)				X						X			X			
233	(W. Zhang, Yin, Liu, & Linn, 2005)			X							X	X		X			
234	(H. Allaoui & Artiba, 2004)			X						X				X			
235	(Bertel & Billaut, 2004)				X				X								X
236	(Engin & Döyen, 2004)			X									X	X			
237	(Kurz & Askin, 2004)							X			X			X			
238	(C. J. Liao & Chen, 2004)	X						X			X			X			
239	(Mosheiov & Yovel, 2004)							X					X	X			
240	(Ceyda Oğuz, Zinder, Janiak, & Lichtenstein, 2004)	X		X						X				X			
241	(Rangsaritratsamee, Ferrell, & Kurz, 2004)							X	X					X			
242	(Ulusoy, 2004)			X					X					X			
243	(Tupia et al., 2004)							X					X	X			
244	(Williams, Pitts, & Kamery, 2004)							X			X						X
245	(P.-C. Chang, Hsieh, & Wang, 2003)							X	X					X			
246	(Mohammad H Faze Zarandi & Esmaeilian, 2003)	X						X	X					X			
247	(Joines, Sutton, Thoney, King, & Hodgson, 2003)							X					X	X			
248	(F.-C. Lee & Yao, 2003)							X					X			X	
249	(H.-T. Lin & Liao, 2003)			X							X						X
250	(C Oğuz, Ercan, Cheng, & Fung, 2003)	X		X							X			X			
251	(Rajendran & Ziegler, 2003)				X						X			X	X		
252	(Gagné, Price, & Gravel, 2002)						X			X					X		
253	(J. N. D. Gupta, Krüger, Lauff, Werner, & Sotskov, 2002)	X		X							X			X		X	
254	(D.-W. Kim, Kim, Jang, & Chen, 2002)					X				X					X		

No	AUTORES, AÑO	INDUSTRIA TEXTIL	TIPOS DE PROBLEMA						ALGORITMOS DE SOLUCIÓN					FUNCIÓNES OBJETIVO			
			FLOW SHOP HÍBRIDO FLEXIBLE (HFFS)	*FLOW SHOP* HÍBRIDO (HFS)	OTROS *FLOW SHOP*	MÁQUINAS PARALELAS	UNA SOLA MÁQUINA	OTROS PROBLEMAS	GENÉTICO	OTRA METAHEURÍSTICA	HEURÍSTICA	iLP / BRANCH AND BOUND	OTROS ALGORITMOS	*MAKESPAN*/TIEMPO PROCESO	TARDANZA/FECHA ENTREGA	COSTOS	OTROS OBJETIVOS
255	(Mesghouni & Rabenasolo, 2002)							X	X					X			
256	(Pearn, Chung, & Yang, 2002)					X							X	X			
257	(Saydam & Cooper, 2002)							X			X						X
258	(Alarcón Valero, García Sabater, Ortiz Bas, & Alemany Díaz, 2001)							X					X	X	X		
259	(Aldowaisan, 2001)				X						X			X			
260	(Al-Khayyal, Griffin, & Smith, 2001)	X						X			X						X
261	(Gendreau, Laporte, & Guimarães, 2001)							X			X			X			
262	(Néron, Baptiste, & Gupta, 2001)			X									X	X			
263	(Riane, Artiba, & Iassinovski, 2001)	X		X									X			X	
264	(Soewandi & Elmaghraby, 2001)							X			X			X			
265	(M. X. Weng, Lu, & Ren, 2001)					X					X			X			
266	(Yokoyama, 2001)	X		X									X	X			
267	(Valerie Botta-Genoulaz, 2000)	X		X							X				X		
268	(Grabowski & Pempera, 2000)							X		X				X			
269	(Hitoshi Tsubone, Suzuki, Uetake, & Ohba, 2000)			X									X	X			
270	(Xiao, Hao, Zhang, & Xu, 2000)	X		X					X					X			
271	(Xing & Zhang, 2000)					X					X					X	
272	(Valkrie Botta-Genoulaz, 1997)			X							X			X			
273	(Carreno, 1990)					X					X			X		X	
274	(Daly, Cassidy, & Kulasiri, 1995)							X					X				X
275	(Frendewey & Sumichrast, 1988)	X				X						X				X	
276	(Guinet, 1991)	X				X					X						X
277	(Hung, Shih, & Chen, 1999)							X	X							X	
278	(Jinrong, Dao, & Weisun, 1994)							X			X						X
279	(Karacapilidis & Pappis, 1996)	X						X					X	X			
280	(Rotab Khan, Harlock, & Leaf, 1999)							X					X				X
281	(Lane & Evans, 1995)							X					X				X
282	(Y. H. Lee & Pinedo, 1997)					X				X					X		
283	(McCormick & Pinedo, 1995)					X							X	X			
284	(Ceyda Oğuz & Fikret Ercan, 1997)				X						X			X			
285	(Onwubolu & Mutingi, 1999)				X				X						X		
286	(Saydam & Cooper, 2002)							X					X				X
287	(Serafini, 1996)	X						X					X		X		
288	(Shiroma & Niemeyer, 1998)	X						X	X							X	
289	(H Tsubone, Ohba, Takamuki, & Miyake, 1993)	X			X								X			X	
290	(Uetake, Tsubone, & Ohba, 1995)			X									X	X			
291	(Weintraub et al., 1999)							X		X							X
Totales		51	24	80	53	52	21	66	74	69	70	36	62	200	70	26	37
Participación		18%	8%	27%	18%	18%	7%	23%	25%	24%	24%	12%	21%	69%	24%	9%	13 %

E. Anexo: Condiciones de entorno real

La **Tabla 7-2** resume los resultados de la evaluación de la literatura científica entre 2010 y 2015 sobre las condiciones realistas de producción aplicadas a problemas de secuenciación de entornos afines al modelo de la industria de tejidos técnicos

Tabla 7-2. Condiciones de entorno real consideradas en artículos sobre secuenciación en modelos afines al de la industria de tejidos técnicos. En tres páginas

Autores, Año	MÁQUINAS PARALELAS NO IDÉNTICAS/NO RELACIONADAS	LOTE DE TRANSFERENCIA	TIEMPO DE MONTAJE DEPENDIENTE DE LA SECUENCIA	MALEABILIDAD	ENTRADA DINÁMICA	3 O MÁS ETAPAS	FUNCIÓN OBJETIVO TARDANZA/ENTREGA/COSTO	DATOS BASADOS EN PRODUCCIÓN REAL	RESTRICCIÓN DE DISPONIBILIDAD	TOTAL
(Cui & Gu, 2015)						X				1
(J. Li et al., 2015)						X	X	X		3
(J. T. Lin & Chen, 2015)	X		X	X		X		X	X	6
(Sangsawang et al., 2015)										0
(Zandieh & Hashemi, 2015)			X		X	X			X	4
(Mirabi, 2014)			X			X				2
(Naderi et al., 2014)						X				1
(Rabiee et al., 2014)	X		X		X					3
(Sioud et al., 2014a)	X		X			X			X	4
(Sioud et al., 2014b)	X		X			X	X		X	5
(Sioud et al., 2014c)	X		X			X			X	4
(Attar, Mohammadi, & Tavakkoli-Moghaddam, 2013)	X		X			X				3
(Attar, Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam, et al., 2013)	X		X			X	X			4
(Bozorgirad & Logendran, 2013)	X		X		X	X				4
(Carpov et al., 2012)										0
(De Siqueira et al., 2013)	X		X			X			X	4
(Sioud et al., 2013)	X		X			X			X	4
(Torabi et al., 2013)	X		X		X		X		X	5
(Xu et al., 2013)						X				1
(F. Defersha & Chen, 2012)			X	X		X				4
(Gicquel et al., 2012)			X				X	X		3

Autores, Año	MÁQUINAS PARALELAS NO IDÉNTICAS/NO RELACIONADAS	LOTE DE TRANSFERENCIA	TIEMPO DE MONTAJE DEPENDIENTE DE LA SECUENCIA	MALEABILIDAD	ENTRADA DINÁMICA	3 O MÁS ETAPAS	FUNCIÓN OBJETIVO TARDANZA/ENTREGA/COSTO	DATOS BASADOS EN PRODUCCIÓN REAL	RESTRICCIÓN DE DISPONIBILIDAD	TOTAL
(Kis & Kovács, 2012)							X			1
(Q.-K. Pan & Ruiz, 2012)		X	X			X				3
(Sadykov, 2012)				X		X	X			3
(Yao et al., 2012)					X					1
(X. Zhang & van de Velde, 2012)										0
(Abir Ben Hmida, Haouari, Huguet, Lopez, & Ben, 2011)										0
(P.-C. Chang & Chen, 2011)	X		X							2
(Choong et al., 2011)						X				1
(F. Defersha, 2011)			X	X	X	X			X	5
(Driessel & Mönch, 2011)			X				X			2
(Engin et al., 2011)										0
(Han et al., 2011)						X	X			2
(Hekmatfar et al., 2011)			X							1
(Hidri & Haouari, 2011)						X				1
(James & Almada-lobo, 2011)			X				X			2
(S. Lin et al., 2011)			X				X			2
(Mahdavi et al., 2011)	X					X	X			3
(Mirsanei et al., 2011)			X			X				2
(Qiao & Sun, 2011)						X	X			2
(Sarıçiçek & Çelik, 2011)				X			X			2
(Shah & Ierapetritou, 2011)							X			1
(Vallada & Ruiz, 2011)	X		X							2
(Yalaoui et al., 2011)	X						X		X	3
(J. Yang, 2011)							X			1
(Yue-wen et al., 2011)	X									1
(Gacias et al., 2010)			X							1
(Zandieh & Karimi, 2011)			X			X	X			3
(Behnamian et al., 2010)			X			X	X			3
(Chyu & Chang, 2010)	X		X			X	X			4
(F. M. Defersha & Chen, 2010)		X	X	X		X				4
(J. Gao, 2010)	X					X			X	3
(Karimi et al., 2010)			X			X	X			3
(Kahraman et al., 2010)						X				1
(Khalouli et al., 2010)						X	X			2
(Lei, 2010)	X					X	X		X	4
(Morais & Moccellin, 2010)			X			X	X			3

Autores, Año	MÁQUINAS PARALELAS NO IDÉNTICAS/NO RELACIONADAS	LOTE DE TRANSFERENCIA	TIEMPO DE MONTAJE DEPENDIENTE DE LA SECUENCIA	MALEABILIDAD	ENTRADA DINÁMICA	3 O MÁS ETAPAS	FUNCIÓN OBJETIVO TARDANZA/ENTREGA/COSTO	DATOS BASADOS EN PRODUCCIÓN REAL	RESTRICCIÓN DE DISPONIBILIDAD	TOTAL
(Naderi, Ruiz, et al., 2010)			X			X				2
(Omar et al., 2010)			X				X	X		3
(Q. Pan et al., 2010)		X	X			X				3
(M. Rocha et al., 2010)	X		X				X			3
(Uhlig & Rose, 2010)			X			X				2
(Urlings et al., 2010)	X		X		X	X			X	5
(Ying & Cheng, 2010)			X				X			2
(Zandieh et al., 2010)	X		X		X	X			X	5
(Zandieh & Karimi, 2010)			X			X	X			3
(Zhou & Lu, 2010)							X			1
Totales	23	5	40	6	8	42	29	4	14	
Participación	34%	7%	60%	9%	12%	63%	43%	6%	21%	

F. Anexo: Trabajos sobre secuenciación en ambientes Flow Shop Híbrido Flexible en publicaciones ciéntificas

Tabla 7-3: Publicaciones científicas de solución al problema de secuenciación en *Flow Shop* Híbrido Flexible

	ALGORITMOS		FUNCIÓN OBJETIVO		DATOS DE PRUEBA				ENTORNO REALISTA								
Autores, Año	PROPUESTOS	COMPARADO CON	MAKESPAN	TARDANZA	CASOS	TRABAJOS	ETAPAS	MÁQ POR ETAPA	MÁQUINAS PARALELAS NO IDÉNTICAS/NO RELACIONADAS	LOTE DE TRANSFERENCIA	TIEMPO DE MONTAJE DEPENDIENTE DE SECUENCIA	MALEABILIDAD	ENTRADA DINÁMICA	3 O MÁS ETAPAS	FUNCIÓN OBJETIVO TARDANZA/ENTREGA/COSTO	DATOS BASADOS EN PRODUCCIÓN REAL	RESTRICCIÓN DE ELEGIBILIDAD
(J. Li et al., 2015)	DABC	GA PSO ABC		X	15	40-152	5	4,2,5,2,5						X	X	X	
(Zandieh & Hashemi, 2015)	GA SIM		X		27	5-12	3-9	5-12			X		X	X			X
(Sioud et al., 2014a)	ACO	ILS GAR	X		960 Ruiz	20-120	2-8	1-4	X		X			X			X
(Sioud et al., 2014b)	ACO	ILS GAR	X		960 Ruiz	20-120	2-8	1-4	X		X			X			X
(Sioud et al., 2014c)	NSO	EDD, SLACK, MDD, NEH		X	160 Ruiz	20-120	2-8	1-4	X		X			X	X		X
(Naderi et al., 2014)	PSO	ILS	X		24	6-12	2-4	1-3						X			
(Attar, Mohammadi, & Tavakkoli-Moghaddam, 2013)	BBO	PBSA ICA	X		36	20-100	2-8	2-8	X		X			X			
(Attar, Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam, et al., 2013)	PSO	PARETO EVOL	X	X	60	10-100	2-8	2-8	X		X			X	X		
(Sioud et al., 2013)	GA	ILS GAR	X		960 Ruiz	20-120	2-8	1-4	X		X			X			X

	ALGORITMOS		FUNCIÓN OBJETIVO		DATOS DE PRUEBA				ENTORNO REALISTA								
Autores, Año	PROPUESTOS	COMPARADO CON	MAKESPAN	TARDANZA	CASOS	TRABAJOS	ETAPAS	MÁQ POR ETAPA	MÁQUINAS PARALELAS NO IDÉNTICAS/NO RELACIONADAS	LOTE DE TRANSFERENCIA	TIEMPO DE MONTAJE DEPENDIENTE DE SECUENCIA	MALEABILIDAD	ENTRADA DINÁMICA	3 O MÁS ETAPAS	FUNCIÓN OBJETIVO TARDANZA/ENTREGA/COSTO	DATOS BASADOS EN PRODUCCIÓN REAL	RESTRICCIÓN DE ELEGIBILIDAD
(De Siqueira et al., 2013)	Evolutionary	Mejor conocido para cada instancia	X		96 Ruiz	15,50	2-8	1-4	X		X			X			X
(F. Defersha & Chen, 2012)	PGA	SGA	X		11	2-30	3-30	1-5			X	X		X			
(F. Defersha, 2011)	CPLEX		X		1	2	3	3,2,2			X	X	X	X			X
(Yalaoui et al., 2011)	PSO	CGA, Enumeración completa		X	125	10	2	5	X						X		X
(Karimi et al., 2010)	MOGA	MPGA CGA	X	X	30	3-12	2-8	1-3			X			X	X		
(Naderi, Ruiz, et al., 2010)	NEH MDDR ILS	RKGA IA-Z GA-R Johnson SPTCH FTIMH	X		960	20-150	2-8	1-4			X			X			
(Urlings et al., 2010)	BGA, SGA, SGAR, SGAM, EGA	LPT MWR NEH LWR MWRST RS SPT	X		768 Ruiz	5-15	2-3	1-3	X		X		X	X			X
(Zandieh et al., 2010)	GA	SPT LPT NEH	X		3456	10,15	2,3	2,3	X		X		X	X			X
(Zandieh & Karimi, 2010)	MPGA	MOGA NSGA II	X	X	30	3-12	2-8	4-12			X			X	X		
(Jabbarizadeh et al., 2009)	GA, SA	SPT, LPT, Johnson	X		2835	40-100	2-8	1-4			X		X	X			X

Autores, Año	ALGORITMOS		FUNCIÓN OBJETIVO		DATOS DE PRUEBA				ENTORNO REALISTA								
	PROPUESTOS	COMPARADO CON	MAKESPAN	TARDANZA	CASOS	TRABAJOS	ETAPAS	MÁQ POR ETAPA	MÁQUINAS PARALELAS NO IDÉNTICAS/NO RELACIONADAS	LOTE DE TRANSFERENCIA	TIEMPO DE MONTAJE DEPENDIENTE DE SECUENCIA	MALEABILIDAD	ENTRADA DINÁMICA	3 O MÁS ETAPAS	FUNCIÓN OBJETIVO TARDANZA/ENTREGA/COSTO	DATOS BASADOS EN PRODUCCIÓN REAL	RESTRICCIÓN DE ELEGIBILIDAD
(Solano Charris, 2009)	MHF ACO	LEKIN	X		1	16	2	1,2									
(Zandieh, Dorri, et al., 2009)	SA, GA	TS	X		126	3-12	2-9	4-12			X			X			
(Ruiz et al., 2008)	MIP CPLEX	LPT SPT LWR MWR MWR-AST NEH	X		768	5-15	2-3	1-3	X		X		X	X			X

G. Anexo: Máquinas en plantas para casos de prueba

Tabla 7-4: Lista de máquinas para casos de prueba, incluye código de la máquina, etapa a la que corresponde, tipo de máquina, tasa de producción en kilogramos por hora, utilización en porcentaje, referencia en curso al momento de programar y fecha prevista en la que estará disponible para un nuevo trabajo.

MÁQUINA	ETAPA	TIPO	TASA PRODUCCIÓN	UTILIZACIÓN	REFERENCIA ACTUAL	FECHA DISPONIBLE
H01	1	retorcedor	39,9	81%	RY665P675	31/10/2014
H02	1	retorcedor	38,85	84%	OP675X695	31/10/2014
H03	1	retorcedor	41,55	84%	OP675X695	31/10/2014
H04	1	retorcedor	49,95	80%	RU695Q696	31/10/2014
H05	1	retorcedor	35,25	81%	VQ595O697	31/10/2014
U01	2	urdidora	115,2	82%	VQ595O658	31/10/2014
U02	2	urdidora	106,65	77%	RY665P675	31/10/2014
T01	3	telar	8,22	87%	PP895R677	31/10/2014
T02	3	telar	6,86	72%	RQ675U577	31/10/2014
T03	3	telar	7,8	72%	RZ695Q685	1/11/2014
T04	3	telar	5,48	85%	YP965W658	31/10/2014
T05	3	telar	7,13	81%	OP675X695	31/10/2014
T06	3	telar	8,37	78%	OP675T665	31/10/2014
T07	3	telar	7,16	85%	PP575U695	31/10/2014
T08	3	telar	6,29	88%	OP765S699	1/11/2014
T09	3	telar	8,51	82%	PP895R657	31/10/2014
T10	3	telar	6,72	83%	VV575O657	6/11/2014
T11	3	telar	7,13	87%	VV575O657	3/11/2014
T12	3	telar	7,32	87%	YP965X658	4/11/2014
T13	3	telar	6,87	77%	YP965W658	4/11/2014
T14	3	telar	7,38	77%	RU695Q697	3/11/2014
T15	3	telar	6,68	82%	VX695T686	31/10/2014
T16	3	telar	6,68	83%	VQ565O665	31/10/2014
T17	3	telar	7,08	85%	VQ595O688	31/10/2014
T18	3	telar	5,21	84%	PP685X695	31/10/2014
T19	3	telar	7,8	80%	PP895R677	31/10/2014
T20	3	telar	7,01	76%	OP675X696	31/10/2014
A01	4	acabados	255,6	69%	VQ775O655	31/10/2014

H. Productos para los casos de prueba

Tabla 7-5: Lista de productos usada en los casos de prueba, incluye código del producto, máquinas elegibles para procesarlo (H=etapa 1, U=etapa 2; T= Etapa 3, A= Etapa 4) y Unidad comercial en Kilogramos

CÓDIGO	MÁQUINAS	UNIDAD
OP675T665	H03 H04 U01 U02 T03 T05 T06 T07 T09 T11 T12 T14 T15 T17 A01	96,6
OP675T685	H01 H02 H03 H04 U01 U02 T03 T04 T11 T13 T14 T16 T17 T18 A01	117,5
OP675T775	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T07 T10 T12 T13 T15 T18 T20 A01	96
OP675X695	H02 H03 H05 U01 U02 T01 T02 T05 T08 T09 T12 T13 T19 A01	24
OP675X696	H02 H03 H05 U01 U02 T02 T04 T05 T07 T08 T10 T11 T13 T16 T17 T20 A01	147
OP765S699	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T06 T07 T08 T11 T13 T14 T17 T19 T20 A01	95,4
PP575R596	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T04 T05 T06 T08 T09 T10 T14 T15 T16 T18 T19 T20 A01	183,4
PP575R657	H01 H02 H03 H04 U01 U02 T01 T03 T04 T08 T13 T14 T15 T17 T18 T19 T20 A01	70
PP575U655	H01 H02 H03 H05 U01 U02 T01 T03 T04 T05 T07 T09 T10 T11 T12 T13 T15 T16 T18 T19 T20 A01	110,29
PP575U695	H01 H02 H05 U01 U02 T01 T04 T05 T07 T11 T13 T15 T16 T19 T20 A01	225
PP685X695	H01 H02 U01 U02 T01 T02 T05 T06 T09 T11 T13 T14 T15 T16 T17 T18 A01	105
PP865X576	H01 H02 H04 H05 U01 U02 T02 T03 T04 T05 T08 T09 T12 T15 T16 T20 A01	126
PP895R657	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T09 T10 T11 T12 T13 T15 T17 T18 T20 A01	91
PP895R677	H01 H03 H05 U01 U02 T01 T03 T04 T06 T07 T08 T09 T10 T12 T13 T16 T18 T19 A01	125
PP955R558	H01 H03 H05 U01 U02 T01 T05 T06 T08 T14 T15 T16 T17 T18 T20 A01	158,75
PP955U599	H04 H05 U01 U02 T02 T03 T05 T06 T07 T09 T10 T11 T13 T15 T16 T17 T19 T20 A01	138
PP965X695	H01 H02 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T03 T04 T06 T10 T12 T14 T15 T16 T17 T19 A01	121,6
PP975X579	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T05 T07 T09 T10 T11 T13 T16 T17 A01	94,85
QQ575R598	H03 H05 U01 U02 T07 T08 T09 T10 T13 T14 T15 T20 A01	230,5
RQ675U577	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T03 T05 T06 T10 T12 T14 T15 T16 T18 T19 T20 A01	175
RQ695Q695	H03 H04 H05 U01 U02 T03 T04 T05 T10 T11 T12 T13 T15 T16 T18 T20 A01	192,65
RU695Q696	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T06 T09 T10 T12 T17 T18 T19 T20 A01	90,4
RU695Q697	H01 H05 U01 U02 T04 T10 T11 T12 T13 T14 T16 T18 T20 A01	120,74
RV895O697	H01 H02 H05 U01 U02 T06 T07 T08 T10 T12 T13 T14 T15 T16 T17 T19 T20 A01	135,75
RY665P675	H01 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T03 T04 T05 T06 T08 T11 T12 T13 T15 T20 A01	90
RZ655Q685	H02 H03 U01 U02 T01 T02 T04 T05 T07 T08 T09 T10 T12 T13 T14 T15 T16 T18 T19 A01	163,6
RZ695Q685	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T03 T04 T06 T07 T08 T09 T10 T11 T13 T15 T16 T19 T20 A01	125
ST965N657	H01 H02 H03 H05 U01 U02 T01 T02 T06 T10 T13 T14 T15 T17 A01	249,75
TT885X678	H01 H02 H03 H04 U01 U02 T04 T06 T10 T11 T12 T14 T17 T19 T20 A01	135
US965T695	H01 H02 H03 U01 U02 T02 T04 T05 T06 T07 T10 T11 T15 T16 A01	84,67
V6599O598	H01 H03 H04 H05 U01 U02 T02 T04 T05 T07 T08 T09 T10 T12 T14 T16 T17 T20 A01	85,31
V6599O678	H01 H05 U01 U02 T01 T02 T09 T10 T14 T16 T19 T20 A01	119,88
V6599O688	H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T05 T06 T07 T08 T10 T11 T15 T16 A01	152,3
V9578O596	H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T04 T08 T10 T11 T13 T15 T17 T18 A01	143,6
VQ565O655	H01 H03 H04 U01 U02 T03 T06 T08 T09 T12 T15 T16 T19 A01	195
VQ565O665	H01 H02 H04 H05 U01 U02 T03 T04 T06 T07 T08 T10 T11 T12 T13 T14 T15 T16 T19 A01	162,5

CÓDIGO	MÁQUINAS	UNIDAD
VQ565O678	H03 H04 H05 U01 U02 T04 T06 T07 T08 T09 T10 T11 T17 T18 T19 A01	148,8
VQ575O686	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T03 T06 T07 T09 T13 T16 T18 A01	145,1
VQ575O688	H01 H02 H04 H05 U01 U02 T05 T07 T08 T10 T12 T13 T14 T17 T18 T19 A01	105,1
VQ595O586	H01 H02 H04 U01 U02 T03 T04 T06 T07 T08 T09 T11 T13 T16 T18 T19 A01	133
VQ595O595	H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T04 T05 T07 T09 T12 T14 T17 T18 A01	133
VQ595O658	H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T06 T08 T09 T13 T16 T17 T19 T20 A01	144,4
VQ595O676	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T02 T03 T06 T07 T08 T09 T10 T12 T15 T16 T19 A01	126
VQ595O688	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T07 T13 T17 A01	100
VQ595O697	H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T04 T09 T10 T11 T13 T16 T17 T18 A01	126
VQ665O595	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T03 T04 T05 T06 T08 T11 T12 T17 T18 T20 A01	127,4
VQ665O696	H03 U01 U02 T01 T03 T04 T08 T10 T14 T18 T19 A01	125
VQ775O655	H02 H03 H04 U01 U02 T01 T02 T05 T08 T09 T10 T11 T12 T13 T16 T17 A01	120
VQ775O676	H01 H02 H04 H05 U01 U02 T02 T06 T08 T10 T13 T14 T15 T17 T20 A01	123,5
VS677X678	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T04 T06 T08 T11 T12 T15 T17 T18 A01	125,15
VS695X655	H01 H02 H04 H05 U01 U02 T03 T07 T09 T11 T12 T13 T14 T16 T18 A01	150
VS695X675	H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T02 T05 T06 T08 T13 T17 T18 T19 T20 A01	125
VS778X685	H01 H02 H03 H04 U01 U02 T05 T06 T08 T09 T11 T14 T15 T18 T19 A01	76
VV565O695	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T02 T04 T05 T06 T08 T10 T11 T13 T14 T15 T18 T20 A01	102,4
VV575O657	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T02 T04 T06 T08 T10 T11 T12 T16 T18 A01	120
VX695T686	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T01 T04 T08 T14 T15 T16 T18 T19 A01	128
YP575W685	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T05 T06 T09 T11 T15 T19 A01	100
YP755W665	H01 H03 H05 U01 U02 T03 T10 T11 T12 T17 T18 T19 T20 A01	120
YP965W658	H01 H02 H03 H04 U01 U02 T04 T05 T06 T07 T08 T09 T10 T12 T13 T14 T16 T18 T19 T20 A01	250
YP965X658	H01 H02 H03 H04 H05 U01 U02 T02 T04 T05 T06 T09 T11 T12 T14 T19 T20 A01	250
YR758Q655	H01 H02 H04 U01 U02 T01 T03 T05 T06 T07 T08 T12 T13 T17 T20 A01	250
YR758Q696	H01 H02 H03 U01 U02 T06 T07 T08 T09 T10 T11 T14 T15 T17 T20 A01	131,04

I. Eficiencia y elegibilidad de máquinas por producto y por etapa

Tabla 7-6: Eficiencia en porcentaje según elegibilidad de máquinas. Incluye referencia y eficiencia de cada máquina cuando procesa ese producto. Casillas vacías significan que la máquina no es elegible para ese producto. Casillas con valor cero significan que ese producto no pasa por esa etapa.

ETAPA	1					2		3																				4
MÁQUINA REFERENCIA	H01	H02	H03	H04	H05	U01	U02	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	A01
OP675T665			88	96		77	52			82		80	99	79		55		63	68		92	56		94				52
OP675T685	52	69	95	88		83	56			52	83							62		88	75		76	91	72			92
OP675T775	65	54	87	67	63	78	54	94						67			56		55	56		63			67		57	94
OP675X695		81	57		60	62	92	55	83			88			79	54			63	96						69		0
OP675X696		57	80		56	62	63		69		70	99		88	98		93	99		64			60	92			99	92
OP765S699	83	63	88	96	59	77	67	71					54	93	85			52		92	51			54		73	65	60
PP575R596	65	80	96	96	91	99	71				66	58	57		68	69	54				91	84	92		65	76	85	72
PP575R657	93	95	88	78		54	94	56		97	82				98					84	72	99		78	59	62	66	52
PP575U655	97	64	68		61	54	71	99		76	57	66		73		61	97	87	88	86		63	99		52	52	52	62
PP575U695	77	92			70	97	67	86			87	77		69				72		56		80	74			85	54	85
PP685X695	97	64				95	89	57	90			67	66			55		94		83	88	58	64	58	74			84
PP865X576	76	65		92	84	94	84		68	58	56	92			84	55			52			76	66				55	89
PP895R657	57	68	93	78	80	73	68									75	89	92	99	81		88		61	79		55	52
PP895R677	70		53		96	61	84	91		91	76		92	86	88	66	54		89	59			73		69	56		86
PP955R558	58		87		80	98	79	54				52	93		99						92	53	55	62	78		78	94
PP955U599				97	75	72	90		94	99		77	72	99		71	64	87		88		80	88	57		83	68	0
PP965X695	92	73		54	58	66	72	62	55	93	90		65				94		64		78	76	62	58		94		0
PP975X579	0	0	0	0	0	89	57	58	54			69		95		97	94	77		71			72	80				70
QQ575R598			77		65	58	60							87	53	86	71			95	88	66					89	58
RQ675U577	64	74	76	60	61	71	92	52	62	55		70	72				92		60		82	67	73		98	65	59	62
RQ695Q695			56	91	82	56	62			80	69	93					88	74	52	53		87	93		79		53	56
RU695Q696	0	0	0	0	0	57	95	55					95			67	90		58					52	63	87	72	63
RU695Q697	51				58	81	82				97						76	63	96	82	59		56		86		76	84
RV895O697	78	76			70	58	73						90	81	80		62		69	70	96	56	80	74		66	80	93
RY665P675	61		66	90	78	94	58	68		60	99	73	89		99			70	53	72		75					67	79
RZ655Q685		76	52			62	76	56	90		86	62		55	97	70	82		77	57	90	99	62		86	94		52
RZ695Q685	54	92	70	74	86	52	80	55	64	70	76		65	54	67	71	66	79		78		58	93			57	78	69
ST965N657	0	0	0	0	0	55	99	83	79				80				52			68	83	59		98				61
TT885X678	92	75	98	65		60	78				86		97				77	82	90		65			89		77	65	55
US965T695	63	92	99			74	93		94		56	76	56	91			86	80				60	90					0
V6599O598	0	0	0	0	0	87	80		94		85	63		81	59	56	90		75		80		90	65			70	66
V6599O678	74				79	65	55	66	68							73	77				95		95			90	94	63
V6599O688		62	68	92	87	84	62	82	74			93	99	75	88		71	69				80	53					93

ETAPA	1					2		3																				4
MÁQUINA REFERENCIA	H01	H02	H03	H04	H05	U01	U02	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	A01
V9578O596		76	61	76	55	56	89	82			88				54		66	76		61		92		60	68			59
VQ565O655	72		67	52		53	75			81			72		73	88			76			55	71			70		75
VQ565O665	71	72		55	89	72	68			63	65		72	92	53		97	80	91	76	99	60	69			92		56
VQ565O678			91	66	62	98	97				64		59	84	65	60	95	55						59	96	58		64
VQ575O686	72	82	98	93	58	67	65			89			86	74		94				74			79		90			89
VQ575O688	67	79		66	51	95	85					90		62	58		72		65	68	97			56	66	72		74
VQ595O586	77	60		86		52	90			96	59		84	86	67	57		59		67			98		92	96		60
VQ595O595		57	86	92	86	93	62	86	89		86	56		75		59			81		75			87	90			0
VQ595O658		77	67	98	65	82	76	98	87				92		99	79				81			63	79		95	73	80
VQ595O676	72	61	60	66	58	52	92		99	95			95	83	53	73	88		65			90	63			71		73
VQ595O688	95	73	59	91	87	77	99							93						87				98				72
VQ595O697		94	71	93	53	72	84	62			89					61	82	74		67			85	64	52			89
VQ665O595	96	96	71	57	75	83	99	75		63	92	63	78		93			57	55					56	87		55	64
VQ665O696			54			77	54	67		85	91				53		59				62				88	65		0
VQ775O655		56	71	91		68	95	74	54			67			83	84	66	64	97	66			91	85				68
VQ775O676	66	87		75	89	91	83		52				82		69		63			57	68	53		77			99	84
VS677X678	0	0	0	0	0	68	58	54	97		55		68		55			54	91			56		99	59			55
VS695X655	58	95		67	80	78	54			53				87		98		62	52	71	65		80		61			52
VS695X675		55	57	64	98	59	94	78	68			64	56		81					85				99	59	58	69	64
VS778X685	61	92	70	94		78	89					66	88		84	99		55			83	76			85	79		92
VV565O695	0	0	0	0	0	70	67		68		69	98	62		92		78	77		86	57	85			98		88	91
VV575O657	66	79	86	74	69	86	64		64		96		94		88		66	91	88				98		61			90
VX695T686	0	0	0	0	0	80	80	92			81				79						99	96	80		89	71		91
YP575W685	93	84	64	96	96	70	64					80	52			82		72				64				66		69
YP755W665	69		66		68	81	69			67							66	66	69					52	83	79	98	79
YP965W658	82	66	78	85		96	74				89	65	64	67	62	85	94		64	76	93		54		56	72	90	66
YP965X658	80	71	65	54	57	56	99		65		93	99	63			90		78	61		58					57	68	61
YR758Q655	85	77		96		55	61	76		99		88	94	84	56				63	74				81			57	62
YR758Q696	96	63	66			70	93						53	94	92	61	82	62			90	63		96			57	95

J. Anexo: Pedidos para casos de prueba

Tabla 7-7: Lista de pedidos incluidos en casos de prueba, con código de pedido, nombre del cliente, fecha de toma del pedido, plazo máximo de entrega, referencia y casos en los que se incluye el pedido.

PEDIDO	CLIENTE	FECHA PEDIDO	PLAZO ENTREGA	REFERENCIA	CANTIDAD (Kg)	CASO					
						1	2	3	4	5	6
2012616	MONTAJES INDUSTRIALES	13/10/2014	21/11/2014	PP965X695	1216	X	X	X		X	X
2022317	TELAS E HILOS	4/10/2014	14/11/2014	VQ775O655	880	X	X				X
2023449	HERRERA Y HERRERA	10/10/2014	16/11/2014	OP675X696	294	X	X	X	X		X
2023462	KILOGRAMOS DE CALIDAD	22/10/2014	30/11/2014	PP575R596	366,8	X	X	X	X		X
2101744	NUEVA EMPRESA	3/10/2014	13/11/2014	PP895R677	250	X	X		X		
2101792	DISTRIBUIDORA MAYORISTA	19/10/2014	14/12/2014	YP965W658	500	X			X		
2101793	FABRICA DE LLANTAS	18/09/2014	19/11/2014	YR758Q696	1310,4	X	X	X		X	
2101808	GRAN FABRICA DE BANDAS	9/10/2014	18/11/2014	PP685X695	420	X	X	X	X		
2101829	JAPONESA DE TEXTILES	26/09/2014	11/11/2014	VQ595O688	200	X	X		X		
2101830	MONTAJES INDUSTRIALES	30/09/2014	11/11/2014	VQ565O665	325	X	X		X		
2101831	KILOGRAMOS DE CALIDAD	28/09/2014	11/11/2014	VX695T686	640	X	X		X		
2101841	JAPONESA DE TEXTILES	11/10/2014	18/11/2014	VV565O695	512	X	X	X	X		
2101851	HERRERA Y HERRERA	22/10/2014	10/12/2014	VS677X678	250,3	X			X		
2101852	IMPORTADORA NACIONAL	25/09/2014	9/11/2014	RU695Q697	603,7	X	X				
2101853	EMPAQUES DE COLOMBIA	17/09/2014	24/11/2014	YP755W665	600	X	X	X	X		
2101856	LLANTAS Y LLANTAS	13/10/2014	24/11/2014	QQ575R598	461	X	X	X	X		X
2101859	RINES Y LLANTAS	3/10/2014	19/11/2014	YP575W685	200	X	X	X	X		
2101860	COMERCIAL INDUSTRIAL	22/10/2014	24/12/2014	YP965X658	500	X			X		
2101875	SUMINISTROS INDUSTRIALES	17/10/2014	24/11/2014	OP675T685	235	X	X	X	X		
2101877	PRODUCTORA DE BLINDAJES	15/10/2014	22/11/2014	VS695X675	125	X	X	X	X		
2101894	OPERADORES COLOMBIANOS	26/10/2014	3/12/2014	TT885X678	1350	X				X	X
2101897	TELAS E HILOS	28/10/2014	6/12/2014	VQ595O586	266	X			X		
2101903	NUEVA EMPRESA	24/10/2014	11/12/2014	V6599O678	1198,8	X				X	X
2112280	DISTRIBUIDORA MAYORISTA	10/09/2014	13/11/2014	YP965W658	1000	X	X				
2112544	COMERCIAL INDUSTRIAL	2/09/2014	8/11/2014	YP965X658	500	X	X				
2112583	BODEGA PRINCIPAL	9/09/2014	7/11/2014	VV575O657	600	X	X				
2112587	BODEGA PRINCIPAL	29/08/2014	12/11/2014	VV575O657	1000	X	X				
2112590	BODEGA PRINCIPAL	5/10/2014	13/11/2014	PP895R657	182	X	X		X		X
2112596	ALMACEN CENTRAL	5/10/2014	16/11/2014	OP765S699	954	X	X	X		X	
2112600	OPERADORES COLOMBIANOS	2/10/2014	8/11/2014	PP575U695	450	X	X				
2112604	UNION COMERCIAL	4/10/2014	18/11/2014	OP675T665	966	X	X	X		X	
2112616	OPERADORES COLOMBIANOS	14/10/2014	21/11/2014	V9578O596	1436	X	X	X		X	
2112619	JAPONESA DE TEXTILES	2/10/2014	28/11/2014	VQ595O688	1200	X	X	X		X	
2112620	NUEVA EMPRESA	14/10/2014	28/11/2014	V6599O598	853,1	X	X	X	X	X	X
2112621	COMERCIAL INDUSTRIAL	7/10/2014	22/11/2014	RV895O697	1357,5	X	X	X		X	

PEDIDO	CLIENTE	FECHA PEDIDO	PLAZO ENTREGA	REFERENCIA	CANTIDAD (Kg)	CASO					
						1	2	3	4	5	6
2112625	KILOGRAMOS DE CALIDAD	12/10/2014	23/11/2014	VQ775O676	247	X	X	X	X		
2112628	IMPORTADORA NACIONAL	10/10/2014	29/11/2014	VQ575O686	1451	X	X	X		X	
2112629	JAPONESA DE TEXTILES	23/10/2014	30/11/2014	VV565O695	512	X	X	X	X		X
2112639	RINES Y LLANTAS	14/10/2014	2/12/2014	YP575W685	1800	X				X	X
2112645	DISTRIBUIDORA MAYORISTA	21/10/2014	2/12/2014	ST965N657	499,5	X			X		
2112650	JAPONESA DE TEXTILES	22/10/2014	3/12/2014	VQ565O678	744	X			X	X	
2112652	GRAN FABRICA DE BANDAS	21/10/2014	3/12/2014	VQ565O655	390	X			X		X
2112655	BODEGA PRINCIPAL	20/10/2014	26/11/2014	PP575R657	70	X	X	X	X		
2112658	EMPAQUES DE COLOMBIA	21/10/2014	16/12/2014	US965T695	1693,4	X				X	
2112659	QUIMICA GENERAL	21/10/2014	2/12/2014	OP675X695	24	X			X		
2112661	DISTRIBUIDORA MAYORISTA	24/10/2014	3/12/2014	VS695X655	188	X			X		
2112665	UNION COMERCIAL	18/10/2014	13/12/2014	VQ575O688	2102	X				X	
2112761	ALMACEN CENTRAL	9/09/2014	28/01/2015	VQ595O676	252	X			X		X
2112989	ALMACEN CENTRAL	18/06/2014	24/01/2015	VQ595O676	315	X			X		X
2123115	QUIMICA GENERAL	9/10/2014	16/11/2014	OP675X695	105	X	X	X	X		
2123168	DISTRIBUIDORA MAYORISTA	26/09/2014	9/11/2014	YP965W658	500	X	X				X
2123331	LLANTAS Y LLANTAS	23/10/2014	24/12/2014	YR758Q655	500	X			X		
2123357	PRODUCTORA DE BLINDAJES	2/10/2014	14/11/2014	RZ695Q685	1000	X	X				
2123358	SUMINISTROS INDUSTRIALES	3/10/2014	10/11/2014	RQ675U577	350	X	X				
2123359	NUEVA EMPRESA	1/10/2014	10/11/2014	PP895R677	250	X	X				
2123375	GRAN FABRICA DE BANDAS	21/09/2014	12/11/2014	RY665P675	900	X	X				
2123384	ALMACEN CENTRAL	19/07/2014	3/12/2014	VQ595O676	1260	X				X	
2123389	SUMINISTROS INDUSTRIALES	14/10/2014	23/11/2014	RQ675U577	1750	X	X	X		X	X
2123390	PRODUCTORA DE BLINDAJES	17/10/2014	23/11/2014	RZ695Q685	250	X	X	X	X		
2123395	HERRERA Y HERRERA	24/09/2014	10/11/2014	VQ595O658	722	X	X				
2123412	EMPAQUES DE COLOMBIA	7/10/2014	18/11/2014	VQ595O697	630	X	X	X	X	X	
2123416	JAPONESA DE TEXTILES	17/10/2014	2/12/2014	VQ595O688	600	X			X		
2123417	ALMACEN CENTRAL	19/10/2014	26/11/2014	V6599O688	304,6	X	X	X	X		
2123418	RINES Y LLANTAS	17/10/2014	26/11/2014	PP955R558	317,5	X	X	X	X		X
2123419	TELAS E HILOS	10/10/2014	26/11/2014	VQ775O655	600	X	X	X	X		
2123422	RINES Y LLANTAS	28/10/2014	10/12/2014	VQ665O696	625	X			X	X	X
2123425	FABRICA DE LLANTAS	8/10/2014	22/11/2014	VS778X685	760	X	X	X	X	X	
2123426	DISTRIBUIDORA MAYORISTA	7/10/2014	22/11/2014	VS695X655	150	X	X	X	X		
2123427	QUIMICA GENERAL	16/10/2014	26/11/2014	RQ695Q695	385,3	X	X	X	X		
2123430	GRAN FABRICA DE BANDAS	10/10/2014	22/11/2014	PP685X695	105	X	X	X	X		
2123436	COMERCIAL INDUSTRIAL	21/10/2014	28/11/2014	PP955U599	276	X	X	X	X		
2123437	KILOGRAMOS DE CALIDAD	11/10/2014	26/11/2014	VX695T686	1009	X	X	X		X	
2123439	LLANTAS Y LLANTAS	29/09/2014	6/12/2014	RU695Q696	1808	X				X	
2123442	MONTAJES INDUSTRIALES	24/10/2014	3/12/2014	VQ595O595	266	X			X		
2123443	COMERCIAL INDUSTRIAL	27/10/2014	4/12/2014	PP955U599	276	X			X		
2123444	DISTRIBUIDORA MAYORISTA	21/10/2014	30/11/2014	YP965W658	1000	X	X	X		X	
2123447	QUIMICA GENERAL	2/10/2014	13/11/2014	OP675X695	93,33	X	X		X		
2123449	QUIMICA GENERAL	9/10/2014	16/11/2014	OP675X695	294	X	X	X	X		
2123456	TELAS E HILOS	18/10/2014	24/11/2014	OP675T775	96	X	X	X	X		X

PEDIDO	CLIENTE	FECHA PEDIDO	PLAZO ENTREGA	REFERENCIA	CANTIDAD (Kg)	CASO					
						1	2	3	4	5	6
2123462	FABRICA DE LLANTAS	21/10/2014	30/11/2014	RZ655Q685	327,2	X	X	X	X		X
2123466	QUIMICA GENERAL	9/10/2014	20/11/2014	OP675X695	840	X	X	X	X	X	
2123468	GRAN FABRICA DE BANDAS	11/10/2014	17/11/2014	RY665P675	1135	X	X	X		X	
2123470	SUMINISTROS INDUSTRIALES	28/10/2014	7/12/2014	PP865X576	252	X			X		X
2123475	ALMACEN CENTRAL	15/07/2014	3/01/2015	VQ595O676	630	X			X	X	X
2123479	IMPORTADORA NACIONAL	22/10/2014	3/12/2014	VQ665O595	637	X			X	X	
2123488	TELAS E HILOS	27/10/2014	4/12/2014	OP675T775	128	X			X		
2123512	QUIMICA GENERAL	27/10/2014	5/12/2014	PP975X579	1897	X				X	
2123514	QUIMICA GENERAL	4/10/2014	3/12/2014	OP675X695	840	X			X	X	X
2123525	PRODUCTORA DE BLINDAJES	26/10/2014	17/12/2014	PP575U655	2205,7	X				X	X
				Total general		89	59	40	55	30	24

K. Anexo: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados para cada instancia de prueba primera etapa

Tabla 7-8: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 1 (5-2-20)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-363,8636036***	***-7,58049***	***1379,13252***	***0,682576293***
B	***-96,64484908***	***-2,01343***	***97,2940297***	***0,048153892***
C	*87,89605781*	*1,831168*	*80,4762185*	*0,039830225*
D	-55,42925565	-1,15478	32,0041915	0,015839886
E	-1,794170085	-0,03738	0,03353173	1,65959E-05
AB	*77,66514176*	*1,618024*	*62,8320234*	*0,031097555*
AC	-18,20396005	-0,37925	3,45191835	0,001708464
AD	54,501219	1,135442	30,9414883	0,015313921
AE	5,629832219	0,117288	0,33015636	0,000163405
BC	-7,838904968	-0,16331	0,64008782	0,0003168
BD	*68,36917083*	*1,424358*	*48,6910783*	*0,024098754*
BE	3,58454516	0,074678	0,13384338	6,62433E-05
CD	*87,30555728*	*1,818866*	*79,3985451*	*0,039296851*
CE	*82,33569563*	*1,715327*	*70,6163206*	*0,03495025*
DE	16,26691057	0,338894	2,75637895	0,001364219
ABC	23,93376724	0,49862	5,96692931	0,002953222
ABD	-53,34683623	-1,11139	29,6446348	0,014672067
ABE	-15,39667019	-0,32076	2,46934847	0,001222159
ACD	-21,24305002	-0,44256	4,70069973	0,002326525
ACE	30,5412909	0,636277	9,71635885	0,004808933
ADE	-8,335099657	-0,17365	0,72368632	0,000358175
BCD	-47,98068448	-0,9996	23,9806884	0,011868801
BCE	41,11885361	0,856643	17,6120846	0,008716778
BDE	36,46514668	0,759691	13,8511138	0,006855354
CDE	13,67043117	0,284801	1,94667384	0,00096347
ABCD	13,87382716	0,289038	2,00503208	0,000992354
ABCE	-43,21572053	-0,90033	19,454151	0,009628474
ABDE	-29,23337721	-0,60903	8,90198274	0,004405873
ACDE	-10,17101845	-0,2119	1,07760017	0,000533338
BCDE	-28,61168324	-0,59608	8,52737935	0,00422047
ABCDE	30,12480329	0,6276	9,4531643	0,00467867

Tabla 7-9: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 2 (5-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-366,7585465***	***-7,6408***	***1401,16491***	***0,314669656***
B	***-398,2845525***	***-8,29759***	***1652,40192***	***0,371091755***
C	*146,1677212*	*3,045161*	*222,552112*	*0,049980124*
D	-73,07188017	-1,52233	55,6197882	0,012490935
E	-1,47459548	-0,03072	0,02265033	5,08675E-06
AB	*196,4852992*	*4,093444*	*402,150758*	*0,090313881*
AC	-59,17163237	-1,23274	36,4716883	0,008190709
AD	51,28984668	1,068538	27,4025872	0,006153996
AE	35,77481807	0,745309	13,3316417	0,002993982
BC	***-94,09990174***	***-1,96041***	***92,2374115***	***0,020714417***
BD	53,75391835	1,119873	30,0987889	0,006759501
BE	3,576003932	0,0745	0,13320629	2,99151E-05
CD	*108,2402001*	*2,255004*	*122,041051*	*0,027407634*
CE	*121,0184336*	*2,521217*	*152,556888*	*0,034260795*
DE	32,65755438	0,680366	11,1095402	0,002494949
ABC	29,33523091	0,611151	8,96412263	0,002013137
ABD	-73,8490302	-1,53852	56,809159	0,01275804
ABE	-38,90149654	-0,81045	15,763817	0,003540193
ACD	-31,35593954	-0,65325	10,241614	0,002300033
ACE	11,44062392	0,238346	1,36341537	0,000306192
ADE	15,86703994	0,330563	2,6225308	0,000588961
BCD	-83,47578955	-1,73908	72,5854942	0,016301045
BCE	16,67599865	0,347417	2,8967597	0,000650546
BDE	-11,43054229	-0,23814	1,36101351	0,000305653
CDE	37,24039774	0,775842	14,4463253	0,003244315
ABCD	27,73252048	0,577761	8,01138221	0,001799174
ABCE	-17,2359932	-0,35908	3,09457772	0,000694972
ABDE	9,230499652	0,192302	0,88752212	0,000199317
ACDE	-33,87781531	-0,70579	11,9552747	0,002684882
BCDE	8,122033714	0,169209	0,68716075	0,000154321
ABCDE	14,13226308	0,294422	2,08042562	0,000467216

Tabla 7-10: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 3 (2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-175,4726216***	***-3,65568***	***320,735843***	***0,162261023***
B	***-277,0212919***	***-5,77128***	***799,383293***	***0,404409903***
C	*68,06641843*	*1,41805*	*48,2608054*	*0,024415256*
D	***-131,6573601***	***-2,74286***	***180,558963***	***0,091345208***
E	***-65,43015325***	***-1,36313***	***44,5948433***	***0,022560637***
AB	33,71121017	0,702317	11,8379759	0,00598886
AC	-26,70016552	-0,55625	7,42602957	0,003756846
AD	50,91005216	1,060626	26,9982647	0,013658486
AE	-9,361343272	-0,19503	0,91286196	0,000461819
BC	***-74,00398079***	***-1,54175***	***57,0478039***	***0,028860619***
BD	*81,61794802*	*1,700374*	*69,390515*	*0,035104826*
BE	21,40911531	0,446023	4,77448144	0,002415421
CD	*106,3293963*	*2,215196*	*117,770214*	*0,05958023*
CE	*64,61222589*	*1,346088*	*43,4868722*	*0,022000112*
DE	6,063445728	0,126322	0,38297265	0,000193747
ABC	46,7644609	0,97426	22,7803625	0,011524639
ABD	-39,83738968	-0,82995	16,5314335	0,008363291
ABE	-35,10208875	-0,73129	12,8349649	0,006493239
ACD	-12,00207527	-0,25004	1,50051886	0,000759116
ACE	-14,40786007	-0,30016	2,16235866	0,001093942
ADE	12,09204833	0,251918	1,52310034	0,00077054
BCD	-16,26320641	-0,33882	2,75512378	0,001393824
BCE	35,85630371	0,747006	13,3924429	0,006775269
BDE	-9,159615061	-0,19083	0,87394321	0,00044213
CDE	13,51304943	0,281522	1,90210943	0,000962282
ABCD	-39,84777404	-0,83016	16,5400531	0,008367652
ABCE	13,44822148	0,280171	1,88390272	0,000953071
ABDE	-9,210085513	-0,19188	0,88360078	0,000447016
ACDE	13,84542002	0,288446	1,99682975	0,001010201
BCDE	13,83213437	0,288169	1,99299939	0,001008263
ABCDE	-35,38340506	-0,73715	13,0415141	0,006597733

Tabla 7-11: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 1 (89 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-435,1773532***	***-9,06619***	***1972,70134***	***0,37279426***
B	***-399,1397253***	***-8,31541***	***1659,50542***	***0,313607581***
C	*164,7093367*	*3,431445*	*282,595475*	*0,053403913*
D	-17,85788532	-0,37204	3,32191737	0,000627764
E	-15,19900974	-0,31665	2,40635309	0,000454744
AB	84,87728768	1,768277	75,0432705	0,014181417
AC	-90,32843419	-1,88184	84,9919377	0,016061482
AD	0,836073811	0,017418	0,00728145	1,37602E-06
AE	-55,09611482	-1,14784	31,6206445	0,00597556
BC	-85,16792078	-1,77433	75,5580701	0,014278702
BD	-2,485120551	-0,05177	0,0643315	1,21571E-05
BE	28,6439088	0,596748	8,54659908	0,001615107
CD	*199,44946*	*4,155197*	*414,375907*	*0,078307322*
CE	*114,7927793*	*2,391516*	*137,264398*	*0,02593975*
DE	10,54656313	0,21972	1,15864577	0,000218957
ABC	67,97198466	1,416083	48,1269864	0,009094871
ABD	-22,91740432	-0,47745	5,47091063	0,001033874
ABE	7,034160353	0,146545	0,51541054	9,74005E-05
ACD	11,05670554	0,230348	1,27344518	0,000240651
ACE	62,84550013	1,309281	41,1412176	0,007774725
ADE	-14,39188593	-0,29983	2,15756646	0,000407729
BCD	***-150,7583072***	***-3,1408***	***236,7507***	***0,044740326***
BCE	50,89668441	1,060348	26,9840884	0,005099359
BDE	39,45970147	0,822077	16,2194588	0,003065097
CDE	-36,71626211	-0,76492	14,0425407	0,002653711
ABCD	-4,365068534	-0,09094	0,19847733	3,75076E-05
ABCE	-86,19011933	-1,79563	77,3826736	0,014623509
ABDE	-12,08139188	-0,2517	1,52041698	0,000287323
ACDE	-31,99608096	-0,66659	10,6640541	0,002015256
BCDE	75,35283804	1,569851	59,1463563	0,011177273
ABCDE	16,77345115	0,349447	2,93071524	0,000553836

Tabla 7-12: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 1 (5-2-20)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-291,0444307***	***-6,06343***	***882,363132***	***0,835211016***
B	***-62,99802167***	***-1,31246***	***41,3411535***	***0,039131946***
C	*60,8372924*	*1,267444*	*38,5539182*	*0,036493657*
D	-5,204168321	-0,10842	0,28211842	0,000267042
E	3,012250997	0,062755	0,09451725	8,94664E-05
AB	15,19210395	0,316502	2,4041669	0,002275692
AC	-30,0135859	-0,62528	9,38349311	0,008882054
AD	7,554693824	0,157389	0,59451457	0,000562745
AE	5,983167517	0,124649	0,37289889	0,000352972
BC	-24,99142382	-0,52065	6,50595067	0,006158283
BD	21,18619674	0,441379	4,67557221	0,004425717
BE	1,198180477	0,024962	0,01495455	1,41554E-05
CD	41,39553098	0,862407	17,8498957	0,016896025
CE	*52,56240499*	*1,09505*	*28,7792335*	*0,027241316*
DE	7,825063398	0,163022	0,63782935	0,000603745
ABC	12,73488576	0,26531	1,68934703	0,001599071
ABD	-26,84111306	-0,55919	7,50463906	0,007103603
ABE	-26,37894419	-0,54956	7,24842392	0,006861079
ACD	-17,30925111	-0,36061	3,12093931	0,002954161
ACE	-4,408045673	-0,09183	0,20240486	0,000191589
ADE	0,437365042	0,009112	0,00199259	1,8861E-06
BCD	-20,46490706	-0,42635	4,36262938	0,004129497
BCE	-14,11760155	-0,29412	2,07611118	0,001965167
BDE	3,658926433	0,076228	0,13945565	0,000132003
CDE	10,88587438	0,226789	1,23439855	0,001168434
ABCD	18,89069366	0,393556	3,71727403	0,003518629
ABCE	9,639910822	0,200831	0,96799876	0,00091627
ABDE	-8,687384759	-0,18099	0,78615265	0,000744142
ACDE	0,215325769	0,004486	0,00048297	4,57161E-07
BCDE	5,025452532	0,104697	0,26307472	0,000249016
ABCDE	2,051496011	0,04274	0,04383996	4,14972E-05

Tabla 7-13: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 2 (5-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-174,7723668***	***-3,64109***	***318,181044***	***0,286547549***
B	***-158,7779207***	***-3,30787***	***262,608626***	***0,23650013***
C	*61,74330705*	*1,286319*	*39,7107913*	*0,035762752*
D	42,62194896	0,887957	18,9232347	0,017041891
E	-15,86608386	-0,33054	2,62221476	0,002361515
AB	*87,7397326*	*1,827911*	*80,1902154*	*0,07221772*
AC	-37,84517849	-0,78844	14,9193493	0,013436071
AD	8,305298895	0,173027	0,71852073	0,000647086
AE	-10,45731472	-0,21786	1,13911907	0,001025868
BC	-29,29712597	-0,61036	8,9408499	0,008051952
BD	-23,99417558	-0,49988	5,99708814	0,005400859
BE	12,2405316	0,255011	1,56073556	0,001405568
CD	*106,7096504*	*2,223118*	*118,614057*	*0,106821472*
CE	16,0918637	0,335247	2,6973758	0,002429203
DE	-11,25146878	-0,23441	1,31870364	0,001187598
ABC	19,5405258	0,407094	3,97741821	0,003581984
ABD	-5,846783979	-0,12181	0,35609253	0,00032069
ABE	24,46990919	0,50979	6,23725475	0,005617148
ACD	***-58,2972349***	***-1,21453***	***35,4017458***	***0,031882111***
ACE	24,88107391	0,518356	6,44862332	0,005807502
ADE	*52,62341685*	*1,096321*	*28,8460833*	*0,025978212*
BCD	***-51,68203809***	***-1,07671***	***27,8232611***	***0,025057078***
BCE	18,81923087	0,392067	3,68920261	0,003322423
BDE	23,20945712	0,48353	5,61123854	0,00505337
CDE	8,668425698	0,180592	0,78272504	0,000704907
ABCD	30,42560152	0,633867	9,64288779	0,008684194
ABCE	-10,01496456	-0,20865	1,04478662	0,000940914
ABDE	-44,72550956	-0,93178	20,8372001	0,01876557
ACDE	-10,75759735	-0,22412	1,20547813	0,00108563
BCDE	-6,442120474	-0,13421	0,43230121	0,000389322
ABCDE	-3,272157014	-0,06817	0,11153137	0,000100443

Tabla 7-14: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 3 (2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	15,99835468	0,333299	2,66611825	0,007741249
B	***-99,49720898***	***-2,07286***	***103,121819***	***0,29942094***
C	*43,27703605*	*0,901605*	*19,5093943*	*0,056646801*
D	-0,995071373	-0,02073	0,01031424	2,99481E-05
E	-19,1450554	-0,39886	3,81805361	0,011085968
AB	16,02179915	0,333787	2,673938	0,007763954
AC	-14,84597547	-0,30929	2,29586446	0,006666192
AD	-6,579479685	-0,13707	0,45093284	0,001309313
AE	***-28,01224812***	***-0,58359***	***8,17381296***	***0,0237332***
BC	-25,35734602	-0,52828	6,69786455	0,019447687
BD	14,58134894	0,303778	2,21474726	0,006430663
BE	19,31491393	0,402394	3,88610313	0,011283554
CD	*48,04521903*	*1,000942*	*24,0452403*	*0,069816927*
CE	14,58126275	0,303776	2,21472108	0,006430587
DE	-7,35338442	-0,1532	0,56325273	0,001635441
ABC	23,04131034	0,480027	5,53022898	0,016057381
ABD	-7,710684	-0,16064	0,61931925	0,001798234
ABE	*26,2613071*	*0,547111*	*7,18391928*	*0,020858979*
ACD	***-38,2170408***	***-0,79619***	***15,2139813***	***0,044174789***
ACE	15,44579691	0,321787	2,48513169	0,007215742
ADE	-23,50486622	-0,48968	5,75498683	0,01670998
BCD	6,300095854	0,131252	0,41345008	0,001200479
BCE	13,59414218	0,283211	1,92500731	0,005589385
BDE	*26,16137434*	*0,545029*	*7,12934904*	*0,020700531*
CDE	*35,93374379*	*0,74862*	*13,4503536*	*0,039053981*
ABCD	*55,60354977*	*1,158407*	*32,2057786*	*0,093511583*
ABCE	-9,256319022	-0,19284	0,89249419	0,002591415
ABDE	4,058935335	0,084561	0,17161413	0,000498293
ACDE	6,366253225	0,13263	0,42217896	0,001225824
BCDE	***-57,26619282***	***-1,19305***	***34,1605921***	***0,099187511***
ABCDE	6,678416104	0,139134	0,46459627	0,001348986

Tabla 7-15: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 2 (59 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-296,2391077***	***-6,17165***	***914,14176***	***0,592287916***
B	***-165,6414152***	***-3,45086***	***285,8029***	***0,185176536***
C	26,53830383	0,552881	7,33626636	0,004753291
D	-1,996473136	-0,04159	0,04151984	2,69014E-05
E	-19,1929443	-0,39985	3,83717824	0,002486173
AB	47,68246284	0,993385	23,6835132	0,015344949
AC	-2,423289561	-0,05049	0,06117013	3,96332E-05
AD	18,5152956	0,385735	3,57100178	0,002313712
AE	41,41562311	0,862825	17,8672275	0,011576479
BC	26,34857456	0,548929	7,23174356	0,004685569
BD	44,33815974	0,923712	20,4778376	0,013267938
BE	-13,01853788	-0,27122	1,76544092	0,001143859
CD	*68,52387259*	*1,427581*	*48,9116783*	*0,031690704*
CE	46,46368507	0,967993	22,4882712	0,014570531
DE	31,37393176	0,653624	10,2533708	0,006643332
ABC	-37,63243786	-0,78401	14,7520873	0,009558127
ABD	-0,645705442	-0,01345	0,00434308	2,81395E-06
ABE	-17,21955237	-0,35874	3,08867692	0,002001206
ACD	***-72,50540825***	***-1,51053***	***54,7607732***	***0,035480432***
ACE	25,44828639	0,530173	6,7459925	0,004370843
ADE	6,328476638	0,131843	0,41718351	0,0002703
BCD	-3,962028067	-0,08254	0,16351736	0,000105946
BCE	15,15743471	0,31578	2,39320653	0,001550599
BDE	-18,68978661	-0,38937	3,63862629	0,002357528
CDE	-5,262828509	-0,10964	0,28851421	0,000186933
ABCD	-2,68030183	-0,05584	0,07483352	4,84859E-05
ABCE	-17,58340332	-0,36632	3,22058409	0,002086671
ABDE	-19,42818055	-0,40475	3,93181458	0,002547489
ACDE	28,23046244	0,588135	8,30165635	0,005378784
BCDE	26,87620838	0,559921	7,52427684	0,004875106
ABCDE	-13,93625103	-0,29034	2,02311555	0,001310811

Tabla 7-16: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 1 (5-2-20)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-70,95099771***	***-1,47815***	***52,4379591***	***0,781916043***
B	***-17,56006868***	***-0,36583***	***3,21204179***	***0,04789559***
C	*13,34835907*	*0,278091*	*1,85602802*	*0,027675716*
D	-2,671485933	-0,05566	0,07434205	0,001108534
E	0,226660112	0,004722	0,00053515	7,97982E-06
AB	*16,62128254*	*0,346277*	*2,8777816*	*0,04291135*
AC	-6,973998241	-0,14529	0,50663179	0,007554518
AD	2,516481582	0,052427	0,06596541	0,000983627
AE	6,8008546	0,141684	0,48178774	0,007184062
BC	-8,636340143	-0,17992	0,77694137	0,011585175
BD	1,073384496	0,022362	0,01200161	0,000178959
BE	-1,587282401	-0,03307	0,02624443	0,000391338
CD	9,576951323	0,19952	0,9553958	0,014246155
CE	*17,1917445*	*0,358161*	*3,07870915*	*0,045907433*
DE	0,645402221	0,013446	0,004339	6,47E-05
ABC	2,416711557	0,050348	0,06083849	0,000907178
ABD	-6,773313476	-0,14111	0,47789349	0,007125994
ABE	3,659327794	0,076236	0,13948625	0,002079916
ACD	-5,2287977	-0,10893	0,28479506	0,004246653
ACE	-4,798747283	-0,09997	0,23987474	0,003576835
ADE	0,853135666	0,017774	0,00758167	0,000113052
BCD	-3,220348988	-0,06709	0,10802758	0,001610827
BCE	-4,362275008	-0,09088	0,19822337	0,00295576
BDE	4,023923357	0,083832	0,16866624	0,002515026
CDE	-2,58783347	-0,05391	0,06975919	0,001040197
ABCD	0,062976003	0,001312	4,1312E-05	6,16018E-07
ABCE	4,49292282	0,093603	0,21027454	0,003135458
ABDE	-3,666722469	-0,07639	0,14005056	0,00208833
ACDE	5,353672405	0,111535	0,2985605	0,004451913
BCDE	2,098994027	0,043729	0,0458935	0,00068433
ABCDE	-3,107044575	-0,06473	0,10055965	0,001499471

Tabla 7-17: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 2 (5-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-35,15087804***	***-0,73231***	***12,870669***	***0,388808018***
B	***-19,81493678***	***-0,41281***	***4,08991375***	***0,123551562***
C	*12,4498762*	*0,259372*	*1,61457726*	*0,048774511*
D	2,418585684	0,050387	0,06093288	0,001840712
E	-0,522446948	-0,01088	0,00284324	8,58909E-05
AB	0,652900271	0,013602	0,0044404	0,000134139
AC	-2,504975114	-0,05219	0,06536354	0,001974557
AD	5,614936031	0,116978	0,32841153	0,009920932
AE	*10,54407988*	*0,219668*	*1,15810021*	*0,034984867*
BC	***-9,515111613***	***-0,19823***	***0,94309739***	***0,028489881***
BD	1,284324694	0,026757	0,01718219	0,000519054
BE	-0,609820017	-0,0127	0,00387375	0,000117022
CD	*12,61432188*	*0,262798*	*1,65751163*	*0,050071508*
CE	*11,49251726*	*0,239427*	*1,37581201*	*0,041561689*
DE	-0,692977786	-0,01444	0,00500227	0,000151113
ABC	-4,97806423	-0,10371	0,2581367	0,007798011
ABD	-5,575506386	-0,11616	0,32381533	0,009782086
ABE	***-11,05504687***	***-0,23031***	***1,27306314***	***0,038457764***
ACD	***-8,258973614***	***-0,17206***	***0,71052755***	***0,021464215***
ACE	0,429828034	0,008955	0,0019245	5,8137E-05
ADE	-2,941406666	-0,06128	0,09012368	0,002722532
BCD	***-9,189255621***	***-0,19144***	***0,87960853***	***0,026571956***
BCE	-1,634880211	-0,03406	0,02784201	0,000841075
BDE	1,984433104	0,041342	0,04102057	0,001239184
CDE	0,265996743	0,005542	0,00073702	2,22646E-05
ABCD	1,16852481	0,024344	0,01422344	0,000429674
ABCE	-5,424822814	-0,11302	0,30654899	0,00926049
ABDE	-2,048399434	-0,04267	0,04370771	0,001320359
ACDE	-3,576513419	-0,07451	0,13324425	0,004025155
BCDE	4,707918084	0,098082	0,23088013	0,006974622
ABCDE	-4,1883735	-0,08726	0,18273409	0,005520185

Tabla 7-18: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 3 (2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	*29,94627335*	*0,623881*	*9,34145091*	*0,528707264*
B	***-10,35578277***	***-0,21575***	***1,11710663***	***0,06322598***
C	*9,177531633*	*0,191199*	*0,87736549*	*0,049657115*
D	5,707615886	0,118909	0,33934249	0,0192061
E	1,376602615	0,028679	0,01973995	0,001117241
AB	***-6,221721515***	***-0,12962***	***0,40322728***	***0,02282185***
AC	2,381747707	0,04962	0,05909086	0,003344423
AD	*6,422012746*	*0,133792*	*0,42960675*	*0,024314875*
AE	2,600062999	0,054168	0,07042008	0,003985634
BC	-0,235124844	-0,0049	0,00057587	3,25932E-05
BD	1,755242996	0,036568	0,03209248	0,00181637
BE	1,721861548	0,035872	0,03088341	0,001747939
CD	*6,643881952*	*0,138414*	*0,45980383*	*0,026023968*
CE	2,312283755	0,048173	0,05569434	0,003152187
DE	4,571511336	0,09524	0,21769496	0,012321095
ABC	-1,509989365	-0,03146	0,02375071	0,001344242
ABD	-0,406545498	-0,00847	0,00172166	9,74424E-05
ABE	2,936073181	0,061168	0,08979714	0,005082337
ACD	-1,73007394	-0,03604	0,03117871	0,001764652
ACE	-4,604553199	-0,09593	0,22085323	0,012499847
ADE	-4,961314839	-0,10336	0,25640255	0,014511867
BCD	0,549841629	0,011455	0,00314923	0,00017824
BCE	-4,125513061	-0,08595	0,17729019	0,010034267
BDE	-1,779728737	-0,03708	0,03299411	0,0018674
CDE	*6,373818478*	*0,132788*	*0,42318294*	*0,0239513*
ABCD	-1,647576293	-0,03432	0,02827612	0,001600371
ABCE	4,099898214	0,085415	0,17509547	0,00991005
ABDE	-4,540298184	-0,09459	0,21473237	0,012153419
ACDE	3,46370276	0,07216	0,12497122	0,007073119
BCDE	-3,338564256	-0,06955	0,11610428	0,006571268
ABCDE	-1,343317283	-0,02799	0,01879689	0,001063866

Tabla 7-19: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 3 (40 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-43,30391104***	***-0,90216***	***19,5336324***	***0,330405172***
B	***-22,58171571***	***-0,47045***	***5,31181129***	***0,089847597***
C	*12,40892329*	*0,258519*	*1,60397268*	*0,027130687*
D	-7,694994426	-0,16031	0,61680145	0,010433
E	-8,508524702	-0,17726	0,75411451	0,012755607
AB	-2,772619431	-0,05776	0,08007728	0,001354482
AC	2,665780695	0,055537	0,07402486	0,001252107
AD	7,145301848	0,14886	0,53182644	0,008995675
AE	*11,93261028*	*0,248596*	*1,48319988*	*0,025087854*
BC	7,983391075	0,166321	0,66390139	0,011229681
BD	*13,3049522*	*0,277187*	*1,84397659*	*0,031190277*
BE	4,52571684	0,094286	0,21335534	0,003608838
CD	*30,56878171*	*0,63685*	*9,73385849*	*0,164645117*
CE	*21,74971753*	*0,453119*	*4,92760638*	*0,083348893*
DE	*11,69811294*	*0,243711*	*1,42547757*	*0,024111499*
ABC	-8,127609525	-0,16933	0,68810455	0,011639069
ABD	***-11,42780344***	***-0,23808***	***1,36036137***	***0,023010079***
ABE	-0,063799879	-0,00133	4,24E-05	7,17187E-07
ACD	0,026017389	0,000542	7,0511E-06	1,19267E-07
ACE	2,378826809	0,049559	0,05894601	0,000997053
ADE	8,544792895	0,178017	0,76055714	0,012864582
BCD	-5,76852469	-0,12018	0,34662372	0,00586303
BCE	***-12,15052512***	***-0,25314***	***1,5378673***	***0,026012536***
BDE	***-14,30272829***	***-0,29797***	***2,13091705***	***0,036043783***
CDE	-2,760197021	-0,0575	0,07936133	0,001342372
ABCD	4,844851537	0,100934	0,24450611	0,004135743
ABCE	-5,462965061	-0,11381	0,31087487	0,005258349
ABDE	-9,911556666	-0,20649	1,02332245	0,017309173
ACDE	1,755113335	0,036565	0,03208774	0,000542754
BCDE	0,230822788	0,004809	0,00055499	9,3875E-06
ABCDE	1,490425662	0,031051	0,02313926	0,000391393

Tabla 7-20: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 1 (5-2-20)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-2,01342045***	***-0,04195***	***0,04222773***	***0,405406065***
B	***-1,123284514***	***-0,0234***	***0,01314342***	***0,126182996***
C	*0,487906716*	*0,010165*	*0,00247972*	*0,023806463*
D	-0,300733615	-0,00627	0,00094209	0,009044514
E	-0,277776931	-0,00579	0,00080375	0,007716381
AB	*0,4596122*	*0,009575*	*0,00220045*	*0,021125373*
AC	-0,205026389	-0,00427	0,00043787	0,004203788
AD	0,187470861	0,003906	0,0003661	0,003514705
AE	0,319436123	0,006655	0,00106291	0,010204444
BC	0,17613589	0,003669	0,00032317	0,003102537
BD	0,125568006	0,002616	0,00016424	0,00157681
BE	-0,319172798	-0,00665	0,00106116	0,010187627
CD	*0,477511844*	*0,009948*	*0,00237518*	*0,022802874*
CE	0,308895257	0,006435	0,00099392	0,009542096
DE	0,137443482	0,002863	0,00019678	0,001889164
ABC	-0,27299976	-0,00569	0,00077634	0,007453252
ABD	-0,434581092	-0,00905	0,0019673	0,018886998
ABE	0,062404538	0,0013	4,0566E-05	0,000389452
ACD	***-0,559267225***	***-0,01165***	***0,00325812***	***0,031279516***
ACE	-0,011847757	-0,00025	1,4622E-06	1,40376E-05
ADE	0,05367999	0,001118	3,0016E-05	0,000288168
BCD	0,317491238	0,006614	0,00105001	0,010080563
BCE	-0,062915559	-0,00131	4,1233E-05	0,000395856
BDE	0,032952675	0,000687	1,1311E-05	0,000108593
CDE	0,263961989	0,005499	0,00072579	0,006967935
ABCD	-0,403819994	-0,00841	0,00169865	0,016307858
ABCE	0,051354273	0,00107	2,7471E-05	0,000263739
ABDE	0,039230025	0,000817	1,6031E-05	0,000153907
ACDE	0,024442792	0,000509	6,2234E-06	5,97479E-05
BCDE	-0,221050948	-0,00461	0,000509	0,004886592
ABCDE	*0,453990359*	*0,009458*	*0,00214695*	*0,020611735*

Tabla 7-21: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 2 (5-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-3,332483813***	***-0,06943***	***0,11568175***	***0,022529679***
B	***-8,686927957***	***-0,18098***	***0,78606997***	***0,153091598***
C	*4,804218708*	*0,100088*	*0,24042206*	*0,046823563*
D	-2,289606621	-0,0477	0,05460728	0,010635078
E	***-3,543903716***	***-0,07383***	***0,13082556***	***0,025479021***
AB	0,308503146	0,006427	0,0009914	0,00019308
AC	-1,573636188	-0,03278	0,02579511	0,005023745
AD	1,286520752	0,026803	0,017241	0,003357782
AE	0,15425095	0,003214	0,00024785	4,82697E-05
BC	0,506208331	0,010546	0,00266924	0,000519849
BD	2,496592595	0,052012	0,06492682	0,012644867
BE	*6,282682611*	*0,130889*	*0,41116772*	*0,080077251*
CD	*8,249035263*	*0,171855*	*0,70881857*	*0,138046448*
CE	*4,158807502*	*0,086642*	*0,18016333*	*0,035087834*
DE	0,986211834	0,020546	0,01013139	0,001973147
ABC	-0,520184286	-0,01084	0,00281866	0,000548951
ABD	***-3,772936112***	***-0,0786***	***0,14828174***	***0,028878712***
ABE	0,58643902	0,012217	0,0035824	0,000697693
ACD	***-4,158666238***	***-0,08664***	***0,18015109***	***0,03508545***
ACE	***-3,350528667***	***-0,0698***	***0,11693794***	***0,022774329***
ADE	***-3,979445102***	***-0,08291***	***0,16495816***	***0,03212654***
BCD	***-4,027019548***	***-0,0839***	***0,1689259***	***0,03289928***
BCE	1,499962995	0,031249	0,02343634	0,004564361
BDE	-0,29166969	-0,00608	0,00088616	0,000172584
CDE	-2,17274565	-0,04527	0,04917525	0,009577159
ABCD	-1,012646497	-0,0211	0,0106818	0,002080342
ABCE	*3,288433893*	*0,068509*	*0,11264372*	*0,021938006*
ABDE	1,820654365	0,03793	0,03452898	0,006724716
ACDE	-2,16060361	-0,04501	0,04862717	0,009470417
BCDE	*4,887018806*	*0,101813*	*0,24878076*	*0,048451468*
ABCDE	-1,159317221	-0,02415	0,01400017	0,002726613

Tabla 7-22: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 3 (2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	*7,173247203*	*0,149443*	*0,53599454*	*0,164456387*
B	***-8,584903522***	***-0,17885***	***0,76771426***	***0,235553731***
C	*5,305188889*	*0,110525*	*0,29317739*	*0,089954077*
D	2,46301568	0,051313	0,06319215	0,019388915
E	0,358386949	0,007466	0,00133793	0,00041051
AB	-2,270165977	-0,0473	0,05368389	0,016471546
AC	0,229346964	0,004778	0,00054792	0,000168114
AD	2,230431734	0,046467	0,0518211	0,015899996
AE	1,518757865	0,031641	0,02402735	0,007372185
BC	-1,98256143	-0,0413	0,04094323	0,012562395
BD	-2,19401915	-0,04571	0,05014292	0,015385088
BE	1,212695046	0,025264	0,01531905	0,004700265
CD	*5,435182935*	*0,113233*	*0,30772097*	*0,09441641*
CE	2,12195543	0,044207	0,04690307	0,014391023
DE	-0,323232509	-0,00673	0,00108833	0,000333925
ABC	-0,118293871	-0,00246	0,00014576	4,47243E-05
ABD	-2,203270956	-0,0459	0,0505667	0,015515114
ABE	1,81061142	0,037721	0,0341491	0,010477789
ACD	2,210284388	0,046048	0,05088914	0,015614046
ACE	-0,181380561	-0,00378	0,0003427	0,000105148
ADE	-1,912398625	-0,03984	0,03809655	0,011688963
BCD	-1,187752688	-0,02474	0,01469538	0,004508906
BCE	-0,578687736	-0,01206	0,00348833	0,001070305
BDE	-1,973844169	-0,04112	0,04058397	0,012452165
CDE	1,308642025	0,027263	0,017839	0,005473446
ABCD	-1,64833451	-0,03434	0,02830215	0,008683801
ABCE	0,054526459	0,001136	3,097E-05	9,50241E-06
ABDE	0,556009883	0,011584	0,00322028	0,000988062
ACDE	-0,428645033	-0,00893	0,00191392	0,000587239
BCDE	0,035844295	0,000747	1,3383E-05	4,10638E-06
ABCDE	*3,16822066*	*0,066005*	*0,10455856*	*0,032081155*

Tabla 7-23: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 4 (55 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	-0,153868805	-0,00321	0,00024662	5,17246E-05
B	***-7,044276104***	***-0,14676***	***0,51689402***	***0,108409876***
C	*6,216943363*	*0,12952*	*0,40260817*	*0,084440332*
D	***-5,615461869***	***-0,11699***	***0,32847304***	***0,068891727***
E	-1,392129738	-0,029	0,02018776	0,004234046
AB	-2,196034497	-0,04575	0,05023508	0,010535968
AC	***-4,365951101***	***-0,09096***	***0,19855759***	***0,041644135***
AD	1,660610909	0,034596	0,0287253	0,006024651
AE	*3,638791595*	*0,075808*	*0,13792504*	*0,028927472*
BC	-0,947053009	-0,01973	0,00934281	0,001959497
BD	*3,752168847*	*0,07817*	*0,14665387*	*0,030758196*
BE	-0,088035884	-0,00183	8,0732E-05	1,69323E-05
CD	*3,7635479*	*0,078407*	*0,14754472*	*0,030945037*
CE	*8,095022105*	*0,168646*	*0,68259774*	*0,14316346*
DE	*5,840792534*	*0,121683*	*0,3553631*	*0,074531467*
ABC	-0,384608517	-0,00801	0,00154087	0,000323172
ABD	***-3,1477648***	***-0,06558***	***0,10321274***	***0,021647147***
ABE	***-4,796631667***	***-0,09993***	***0,23966328***	***0,050265366***
ACD	0,615680747	0,012827	0,00394857	0,000828147
ACE	2,926143927	0,060961	0,08919082	0,018706282
ADE	-2,373059416	-0,04944	0,05866053	0,012303065
BCD	1,995528359	0,041574	0,04148056	0,008699853
BCE	1,218083485	0,025377	0,01545549	0,003241531
BDE	0,306066776	0,006376	0,0009758	0,000204658
CDE	2,168586111	0,045179	0,04898714	0,010274234
ABCD	***-5,714492829***	***-0,11905***	***0,34016071***	***0,071343021***
ABCE	-1,660691529	-0,0346	0,02872809	0,006025236
ABDE	*4,353884031*	*0,090706*	*0,19746152*	*0,041414252*
ACDE	-2,014937968	-0,04198	0,04229141	0,008869915
BCDE	***-3,933482851***	***-0,08195***	***0,16116966***	***0,033802641***
ABCDE	1,830297034	0,038131	0,0348957	0,00731879

Tabla 7-24: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (30 trabajos) en planta 1 (5-2-20)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-164,3440661***	***-3,42383***	***281,343459***	***0,91756104***
B	-17,95200161	-0,374	3,3570246	0,010948451
C	15,98042151	0,332925	2,6601445	0,008675677
D	-2,558635777	-0,0533	0,06819393	0,000222405
E	11,42924399	0,238109	1,36070436	0,004437741
AB	4,668223432	0,097255	0,22700323	0,000740338
AC	-5,710219474	-0,11896	0,33965215	0,001107726
AD	0,289234656	0,006026	0,00087142	2,84202E-06
AE	-14,84021455	-0,30917	2,294083	0,00748182
BC	0,046415668	0,000967	2,2442E-05	7,31907E-08
BD	-2,396886876	-0,04994	0,05984444	0,000195174
BE	0,165516404	0,003448	0,00028537	9,30698E-07
CD	4,676646748	0,09743	0,22782318	0,000743012
CE	20,03113135	0,417315	4,17964816	0,013631319
DE	-6,772724167	-0,1411	0,47781034	0,001558309
ABC	-4,18380818	-0,08716	0,18233595	0,000594662
ABD	2,591039035	0,05398	0,06993212	0,000228073
ABE	-3,110279917	-0,0648	0,10076918	0,000328644
ACD	0,83457814	0,017387	0,00725542	2,36625E-05
ACE	-8,358694268	-0,17414	0,72778927	0,00237358
ADE	2,599513193	0,054157	0,0703903	0,000229568
BCD	1,437140483	0,02994	0,0215143	7,01658E-05
BCE	12,67342755	0,26403	1,67308089	0,005456512
BDE	7,837821068	0,163288	0,63991082	0,002086977
CDE	-15,99823959	-0,3333	2,66607989	0,008695034
ABCD	-7,093055464	-0,14777	0,52407746	0,001709203
ABCE	-5,624229052	-0,11717	0,3294995	0,001074615
ABDE	-8,376537996	-0,17451	0,73089988	0,002383724
ACDE	12,63528067	0,263235	1,66302414	0,005423713
BCDE	6,833005286	0,142354	0,48635376	0,001586173
ABCDE	-7,109305441	-0,14811	0,5264815	0,001717043

Tabla 7-25: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (30 trabajos) en planta 2 (5-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-97,93322648***	***-2,04028***	***99,9053838***	***0,481116416***
B	***-31,97882316***	***-0,66623***	***10,6525534***	***0,051299721***
C	*36,30680503*	*0,756392*	*13,7310843*	*0,066125066*
D	-0,448728028	-0,00935	0,00209747	1,01008E-05
E	0,372170396	0,007754	0,00144282	6,94822E-06
AB	3,272372328	0,068174	0,11154605	0,000537175
AC	-7,989492806	-0,16645	0,66491662	0,003202053
AD	*24,6978981*	*0,51454*	*6,35402261*	*0,030599198*
AE	-6,954711003	-0,14489	0,50383339	0,002426321
BC	-13,75253076	-0,28651	1,97012607	0,009487577
BD	***-25,12284163***	***-0,52339***	***6,57455387***	***0,031661215***
BE	5,272528118	0,109844	0,28957867	0,00139453
CD	*35,8362301*	*0,746588*	*13,377452*	*0,064422071*
CE	11,86514658	0,247191	1,46647608	0,007062139
DE	-2,474434657	-0,05155	0,06377945	0,000307144
ABC	7,507011046	0,156396	0,58703349	0,002826989
ABD	13,30493812	0,277186	1,84397269	0,008880057
ABE	-11,77388513	-0,24529	1,44400386	0,006953919
ACD	-18,83776455	-0,39245	3,69647264	0,017801179
ACE	14,08664006	0,293472	2,06701488	0,009954166
ADE	-0,365212231	-0,00761	0,00138937	6,69084E-06
BCD	-2,353533524	-0,04903	0,05769917	0,000277863
BCE	-7,017581678	-0,1462	0,51298388	0,002470387
BDE	-6,26503214	-0,13052	0,40886071	0,001968959
CDE	4,068079613	0,084752	0,17238825	0,000830174
ABCD	16,26661384	0,338888	2,75627839	0,013273467
ABCE	-6,842293491	-0,14255	0,48767688	0,002348516
ABDE	9,592199534	0,199837	0,95844054	0,004615582
ACDE	-7,099148221	-0,1479	0,52497818	0,002528148
BCDE	14,37576536	0,299495	2,15273573	0,010366974
ABCDE	***-26,0218211***	***-0,54212***	***7,05349139***	***0,033967644***

Tabla 7-26: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (40 trabajos) en planta 3 (2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-25,06155917***	***-0,52212***	***6,54251821***	***0,162242538***
B	***-22,02851904***	***-0,45893***	***5,05474637***	***0,125348506***
C	*13,05364216*	*0,271951*	*1,77497472*	*0,044016141*
D	1,391654784	0,028993	0,02017399	0,000500278
E	5,013022145	0,104438	0,26177491	0,006491541
AB	4,065855645	0,084705	0,17219981	0,004270242
AC	-5,012028322	-0,10442	0,26167112	0,006488967
AD	-0,947147513	-0,01973	0,00934467	0,000231731
AE	3,162607053	0,065888	0,10418837	0,002583682
BC	-2,003670169	-0,04174	0,04181973	0,001037053
BD	-2,749651669	-0,05728	0,07875609	0,001953008
BE	-4,306440982	-0,08972	0,1931816	0,004790552
CD	*16,69483811*	*0,347809*	*2,90330854*	*0,071996765*
CE	7,049745727	0,14687	0,51769703	0,012837944
DE	7,789870081	0,162289	0,63210496	0,015675052
ABC	-2,760027176	-0,0575	0,07935156	0,001967774
ABD	7,136662632	0,14868	0,53054118	0,013156455
ABE	-3,686913932	-0,07681	0,14159723	0,003511354
ACD	-4,663637998	-0,09716	0,22655749	0,005618213
ACE	-0,398515699	-0,0083	0,00165432	4,10241E-05
ADE	1,956582731	0,040762	0,03987725	0,000988883
BCD	4,784375225	0,099674	0,23844007	0,005912879
BCE	6,972214142	0,145254	0,5063726	0,012557119
BDE	***-9,561389827***	***-0,1992***	***0,95229349***	***0,023615145***
CDE	*10,46126737*	*0,217943*	*1,13998036*	*0,028269437*
ABCD	-2,10315084	-0,04382	0,04607545	0,001142587
ABCE	1,088636245	0,02268	0,01234509	0,000306136
ABDE	8,312449081	0,173176	0,71975843	0,017848699
ACDE	-5,285673082	-0,11012	0,29102437	0,007216875
BCDE	-8,385042344	-0,17469	0,73238474	0,018161808
ABCDE	*18,22934326*	*0,379778*	*3,46155162*	*0,085840177*

Tabla 7-27: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 5 (30 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-210,1603198***	***-4,37834***	***460,076667***	***0,66227997***
B	***-41,52482286***	***-0,8651***	***17,961572***	***0,025855668***
C	*52,58757402*	*1,095574*	*28,8068015*	*0,041467366*
D	*45,41308095*	*0,946106*	*21,4827908*	*0,030924459*
E	-15,3537966	-0,31987	2,45561531	0,003534856
AB	-2,832906365	-0,05902	0,08359748	0,000120339
AC	***-44,78338669***	***-0,93299***	***20,8911638***	***0,030072812***
AD	-25,11129099	-0,52315	6,56850974	0,009455364
AE	1,318926089	0,027478	0,01812048	2,60844E-05
BC	15,89695854	0,331187	2,63243011	0,003789381
BD	-10,65810017	-0,22204	1,18328228	0,001703334
BE	8,260342658	0,17209	0,71076313	0,001023143
CD	*47,38333964*	*0,987153*	*23,3873008*	*0,033666*
CE	28,26421281	0,588838	8,32151797	0,011978818
DE	2,945214805	0,061359	0,09035719	0,000130069
ABC	-21,55724999	-0,44911	4,84078153	0,006968301
ABD	12,90445103	0,268843	1,73463392	0,002497004
ABE	-2,764105414	-0,05759	0,07958624	0,000114564
ACD	***-52,53874135***	***-1,09456***	***28,7533265***	***0,041390389***
ACE	-10,31812159	-0,21496	1,10899618	0,001596399
ADE	0,116417634	0,002425	0,00014118	2,03225E-07
BCD	-1,821066179	-0,03794	0,0345446	4,97269E-05
BCE	-4,376083979	-0,09117	0,19948032	0,000287152
BDE	-2,430999817	-0,05065	0,06156	8,86156E-05
CDE	35,30917308	0,735608	12,9868511	0,018694561
ABCD	23,92848366	0,49851	5,96429511	0,008585598
ABCE	12,40693759	0,258478	1,60345938	0,002308178
ABDE	3,540407355	0,073758	0,13056754	0,000187952
ACDE	-7,393623288	-0,15403	0,56943401	0,0008197
BCDE	-29,91688549	-0,62327	9,32312539	0,013420631
ABCDE	12,90917279	0,268941	1,73590356	0,002498832

Tabla 7-28: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 1 (5-2-20)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	***-0,530128871***	***-0,01104***	***0,00292746***	***0,047210924***
B	***-1,171003934***	***-0,0244***	***0,01428386***	***0,230354283***
C	*0,910071505*	*0,01896*	*0,0086274*	*0,13913315*
D	0,29617625	0,00617	0,00091375	0,014736015
E	0,047301381	0,000985	2,3306E-05	0,000375861
AB	-0,039268218	-0,00082	1,6062E-05	0,000259037
AC	0,009305435	0,000194	9,0199E-07	1,45463E-05
AD	-0,129143562	-0,00269	0,00017373	0,002801722
AE	-0,136615524	-0,00285	0,00019441	0,003135304
BC	***-0,779221309***	***-0,01623***	***0,00632485***	***0,102000247***
BD	0,086596375	0,001804	7,8114E-05	0,001259734
BE	-0,073188761	-0,00152	5,5798E-05	0,000899846
CD	0,242119008	0,005044	0,00061064	0,009847758
CE	*0,407697963*	*0,008494*	*0,00173143*	*0,027922652*
DE	0,068858353	0,001435	4,939E-05	0,000796513
ABC	-0,179568705	-0,00374	0,00033588	0,005416776
ABD	***-0,752454315***	***-0,01568***	***0,00589779***	***0,095112995***
ABE	0,121939744	0,00254	0,00015489	0,002497872
ACD	0,004141064	8,63E-05	1,7863E-07	2,88074E-06
ACE	-0,082754922	-0,00172	7,1337E-05	0,001150449
ADE	***-0,492813421***	***-0,01027***	***0,00252984***	***0,040798541***
BCD	-0,272063956	-0,00567	0,00077103	0,012434307
BCE	-0,172883704	-0,0036	0,00031134	0,005020971
BDE	-0,315010423	-0,00656	0,00103366	0,016669763
CDE	0,21377122	0,004454	0,00047602	0,007676762
ABCD	-0,313469837	-0,00653	0,00102358	0,016507112
ABCE	0,194843894	0,004059	0,00039546	0,00637754
ABDE	*0,558846817*	*0,011643*	*0,00325323*	*0,052464453*
ACDE	-0,098186143	-0,00205	0,00010042	0,001619496
BCDE	-0,223316162	-0,00465	0,00051948	0,008377605
ABCDE	*0,544699941*	*0,011348*	*0,0030906*	*0,04984186*

Tabla 7-29: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 2 (5-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	*3,084318887*	*0,064257*	*0,09909399*	*0,192357938*
B	***-2,41937406***	***-0,0504***	***0,06097261***	***0,118357997***
C	*1,767640068*	*0,036826*	*0,03254741*	*0,063179945*
D	0,624757045	0,013016	0,00406585	0,007892487
E	-0,278354636	-0,0058	0,0008071	0,00156671
AB	***-1,024929106***	***-0,02135***	***0,0109425***	***0,021241208***
AC	0,723625264	0,015076	0,00545452	0,010588124
AD	0,705459264	0,014697	0,00518409	0,010063185
AE	0,273214831	0,005692	0,00077757	0,001509385
BC	***-1,535478115***	***-0,03199***	***0,0245593***	***0,047673696***
BD	-0,532602318	-0,0111	0,00295485	0,005735848
BE	-0,052074753	-0,00108	2,8248E-05	5,48335E-05
CD	*1,714083498*	*0,03571*	*0,03060502*	*0,059409447*
CE	-0,020115512	-0,00042	4,2149E-06	8,18189E-06
DE	0,416530055	0,008678	0,00180726	0,003508199
ABC	***-1,075199767***	***-0,0224***	***0,01204223***	***0,023375983***
ABD	***-1,096501056***	***-0,02284***	***0,01252411***	***0,024311383***
ABE	-0,165467437	-0,00345	0,0002852	0,000553626
ACD	*1,258103381*	*0,02621*	*0,01648775*	*0,032005471*
ACE	-0,162300472	-0,00338	0,00027439	0,000532637
ADE	-0,84374423	-0,01758	0,00741567	0,014395051
BCD	-0,867108902	-0,01806	0,00783206	0,015203335
BCE	0,219458454	0,004572	0,00050169	0,000973859
BDE	-0,264156669	-0,0055	0,00072686	0,00141096
CDE	0,019885721	0,000414	4,1192E-06	7,99603E-06
ABCD	***-1,042847392***	***-0,02173***	***0,01132844***	***0,021990398***
ABCE	0,478501913	0,009969	0,00238504	0,004629765
ABDE	*1,02704038*	*0,021397*	*0,01098762*	*0,021328809*
ACDE	-0,727728138	-0,01516	0,00551654	0,010708531
BCDE	-0,195521359	-0,00407	0,00039821	0,000773001
ABCDE	0,467904	0,009748	0,00228056	0,004426955

Tabla 7-30: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 3 (2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	*4,866215163*	*0,101379*	*0,24666719*	*0,581158221*
B	***-2,174448915***	***-0,0453***	***0,04925238***	***0,116040659***
C	0,845830498	0,017621	0,00745239	0,017558138
D	-0,049754248	-0,00104	2,5786E-05	6,07536E-05
E	-0,482195292	-0,01005	0,002422	0,005706341
AB	***-1,650244025***	***-0,03438***	***0,02836776***	***0,06683564***
AC	0,641103612	0,013356	0,00428139	0,010087144
AD	-0,320086994	-0,00667	0,00106725	0,002514478
AE	-0,376109523	-0,00784	0,00147352	0,003471686
BC	-0,773165657	-0,01611	0,00622693	0,014670904
BD	0,237126467	0,00494	0,00058572	0,001379977
BE	0,443363277	0,009237	0,00204761	0,004824266
CD	0,052062867	0,001085	2,8235E-05	6,65224E-05
CE	-0,606433193	-0,01263	0,00383085	0,009025634
DE	-0,323818155	-0,00675	0,00109227	0,002573441
ABC	-0,561189187	-0,01169	0,00328056	0,007729125
ABD	-0,012316824	-0,00026	1,5803E-06	3,72314E-06
ABE	0,348796446	0,007267	0,00126728	0,002985767
ACD	-0,1027346	-0,00214	0,00010994	0,000259027
ACE	-0,47605602	-0,00992	0,00236072	0,00556196
ADE	-0,347595203	-0,00724	0,00125857	0,002965236
BCD	-0,057176345	-0,00119	3,4053E-05	8,02314E-05
BCE	0,169454912	0,00353	0,00029911	0,000704726
BDE	0,388660233	0,008097	0,00157351	0,003707251
CDE	-0,443037861	-0,00923	0,00204461	0,004817186
ABCD	0,083077408	0,001731	7,1894E-05	0,000169386
ABCE	0,285418917	0,005946	0,00084858	0,001999297
ABDE	0,408882598	0,008518	0,00174151	0,004103071
ACDE	-0,6362878	-0,01326	0,00421731	0,009936169
BCDE	-0,06105393	-0,00127	3,8829E-05	9,14827E-05
ABCDE	0,131907963	0,002748	0,00018125	0,000427025

Tabla 7-31: Estimaciones de los efectos de los factores y suma de los cuadrados del diseño factorial del caso 6 (24 trabajos) en planta 4 (5-2-20-1)

Término del modelo	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución
A	*3,997645038*	*0,083284*	*0,16647048*	*0,229726425*
B	***-3,669225171***	***-0,07644***	***0,14024181***	***0,193531304***
C	*1,760836764*	*0,036684*	*0,03229736*	*0,0445698*
D	-0,117011904	-0,00244	0,00014262	0,000196817
E	-0,251254661	-0,00523	0,00065759	0,000907467
AB	-0,817193141	-0,01702	0,0069563	0,009599573
AC	0,712432842	0,014842	0,00528709	0,007296093
AD	0,076293551	0,001589	6,0632E-05	8,36716E-05
AE	0,248447815	0,005176	0,00064298	0,000887305
BC	***-1,577657718***	***-0,03287***	***0,02592712***	***0,035778989***
BD	-0,959303347	-0,01999	0,00958607	0,013228616
BE	-0,363689281	-0,00758	0,00137781	0,001901356
CD	0,845303985	0,01761	0,00744311	0,010271369
CE	0,922062512	0,01921	0,00885624	0,012221464
DE	0,75894562	0,015811	0,00599998	0,008279876
ABC	0,31984374	0,006663	0,00106563	0,001470545
ABD	0,18930088	0,003944	0,00037328	0,000515119
ABE	-0,02644995	-0,00055	7,2875E-06	1,00566E-05
ACD	0,189077607	0,003939	0,0003724	0,000513905
ACE	***-1,41882034***	***-0,02956***	***0,02096928***	***0,028937253***
ADE	1,048931834	0,021853	0,01146102	0,015816013
BCD	0,738824089	0,015392	0,00568605	0,007846656
BCE	0,853524868	0,017782	0,00758859	0,010472126
BDE	-0,071621556	-0,00149	5,3434E-05	7,37378E-05
CDE	-0,482412727	-0,01005	0,00242419	0,003345338
ABCD	-0,624255388	-0,01301	0,00405932	0,005601793
ABCE	0,99537489	0,020737	0,01032053	0,01424216
ABDE	***-1,624316541***	***-0,03384***	***0,02748338***	***0,037926593***
ACDE	*1,263589266*	*0,026325*	*0,01663185*	*0,022951673*
BCDE	-0,717094426	-0,01494	0,0053565	0,007391885
ABCDE	***-1,344018864***	***-0,028***	***0,01881653***	***0,025966489***

L. Anexo: Ejemplo de secuencia generada por el algoritmo ABDE

Tabla 7-32: Programación detallada caso 5 (30 trabajos) en planta 1 (5-2-20-1) obtenida con el algoritmo ABDE.

TRABAJO	REFERENCIA	ET	MÁQUNIA	PLAZO ENTREGA	TIEMPO PROCESO	ORDEN	KGS	INICIO	FIN
2012616	PP965X695	1	H01	21/11/2014	40,8967	3	1216	4/11/2014 13:41	6/11/2014 8:34
2012616	PP965X695	2	U01	21/11/2014	19,504	9	1216	8/11/2014 8:17	9/11/2014 6:47
2012616	PP965X695	3	T03	21/11/2014	93,12868	4	486	30/11/2014 3:54	4/12/2014 7:02
2012616	PP965X695	3	T06	21/11/2014	191,0332	3	486	4/12/2014 6:59	12/12/2014 12:01
2012616	PP965X695	3	T14	21/11/2014	274,3417	1	243	9/11/2014 6:47	20/11/2014 23:07
2101793	YR758Q696	1	H01	19/11/2014	42,2352	1	1310	31/10/2014 9:36	2/11/2014 5:50
2101793	YR758Q696	2	U02	19/11/2014	17,1581	2	1310	2/11/2014 5:50	3/11/2014 1:59
2101793	YR758Q696	3	T10	19/11/2014	286,5119	1	1310	3/11/2014 1:59	15/11/2014 6:30
2101793	YR758Q696	4	A01	19/11/2014	7,8211	4	1310	15/11/2014 6:30	15/11/2014 14:49
2101894	TT885X678	1	H03	3/12/2014	39,4691	1	1350	31/10/2014 12:00	2/11/2014 5:28
2101894	TT885X678	2	U02	3/12/2014	21,076	8	1350	9/11/2014 22:43	10/11/2014 22:48
2101894	TT885X678	3	T19	3/12/2014	280,969	3	1350	17/11/2014 20:11	29/11/2014 19:09
2101894	TT885X678	4	A01	3/12/2014	13,9175	12	1350	1/12/2014 2:07	1/12/2014 16:32
2101903	V6599O678	1	H01	11/12/2014	50,1253	4	1198	6/11/2014 8:34	8/11/2014 12:42
2101903	V6599O678	2	U01	11/12/2014	19,5239	12	1198	15/11/2014 8:51	16/11/2014 7:23
2101903	V6599O678	3	T09	11/12/2014	235,3317	3	1198	29/11/2014 17:44	9/12/2014 19:04
2101903	V6599O678	4	A01	11/12/2014	10,7894	21	1198	9/12/2014 19:04	10/12/2014 6:21
2112596	OP765S699	1	H04	16/11/2014	24,8686	1	954	31/10/2014 9:36	1/11/2014 12:28
2112596	OP765S699	2	U01	16/11/2014	13,1157	2	954	1/11/2014 12:28	2/11/2014 4:35
2112596	OP765S699	3	T19	16/11/2014	209,431	1	954	2/11/2014 4:35	11/11/2014 4:00
2112596	OP765S699	4	A01	16/11/2014	9,0154	2	954	11/11/2014 4:00	11/11/2014 13:31
2112604	OP675T665	1	H04	18/11/2014	25,1814	2	966	1/11/2014 12:28	2/11/2014 15:39
2112604	OP675T665	2	U01	18/11/2014	13,2807	3	966	2/11/2014 15:39	3/11/2014 7:55
2112604	OP675T665	3	T03	18/11/2014	209,7665	1	966	3/11/2014 7:55	12/11/2014 7:41
2112604	OP675T665	4	A01	18/11/2014	10,5333	3	966	12/11/2014 7:41	12/11/2014 18:43
2112616	V9578O596	1	H04	21/11/2014	47,2841	8	1436	9/11/2014 3:03	11/11/2014 4:20
2112616	V9578O596	2	U02	21/11/2014	19,6478	10	1436	12/11/2014 0:26	12/11/2014 23:05
2112616	V9578O596	3	T01	21/11/2014	244,8779	1	1436	12/11/2014 23:05	23/11/2014 9:58
2112616	V9578O596	4	A01	21/11/2014	13,8004	15	1436	3/12/2014 14:42	4/12/2014 4:42
2112619	VQ595O688	1	H04	28/11/2014	33	6	1200	5/11/2014 16:16	7/11/2014 3:16
2112619	VQ595O688	2	U02	28/11/2014	14,7603	5	1200	7/11/2014 3:16	7/11/2014 21:02
2112619	VQ595O688	3	T17	28/11/2014	203,4712	1	1200	7/11/2014 21:02	16/11/2014 9:30
2112619	VQ595O688	4	A01	28/11/2014	9,4502	9	1200	29/11/2014 18:36	30/11/2014 4:33
2112620	V6599O598	2	U01	28/11/2014	10,3804	6	853	6/11/2014 6:18	6/11/2014 19:41
2112620	V6599O598	3	T16	28/11/2014	17,09633	4	85	29/11/2014 9:31	30/11/2014 8:36
2112620	V6599O598	3	T02	28/11/2014	183,745	3	767	19/11/2014 13:53	27/11/2014 11:38

TRABAJO	REFERENCIA	ET	MÁQUNIA	PLAZO ENTREGA	TIEMPO PROCESO	ORDEN	KGS	INICIO	FIN
2112620	V6599O598	4	A01	28/11/2014	7,329	10	853	30/11/2014 8:36	30/11/2014 16:08
2112621	RV895O697	1	H01	22/11/2014	53,8502	2	1357	2/11/2014 5:50	4/11/2014 13:41
2112621	RV895O697	2	U02	22/11/2014	22,6446	9	1357	10/11/2014 22:48	12/11/2014 0:26
2112621	RV895O697	3	T19	22/11/2014	32,96183	5	135	1/12/2014 15:16	3/12/2014 6:13
2112621	RV895O697	3	T10	22/11/2014	261,70347	3	814	21/11/2014 8:54	2/12/2014 12:37
2112621	RV895O697	3	T06	22/11/2014	231,0347	1	407	12/11/2014 0:26	21/11/2014 21:29
2112621	RV895O697	4	A01	22/11/2014	8,2765	14	1357	3/12/2014 6:13	3/12/2014 14:42
2112628	VQ575O686	1	H04	29/11/2014	39,0444	10	1451	12/11/2014 13:53	14/11/2014 6:56
2112628	VQ575O686	2	U01	29/11/2014	22,9259	11	1451	14/11/2014 6:56	15/11/2014 8:51
2112628	VQ575O686	3	T09	29/11/2014	221,2056	2	1451	20/11/2014 6:32	29/11/2014 17:44
2112628	VQ575O686	4	A01	29/11/2014	9,2442	19	1451	5/12/2014 21:59	6/12/2014 7:44
2112639	YP575W685	1	H04	2/12/2014	46,9219	12	1800	17/11/2014 14:38	19/11/2014 14:33
2112639	YP575W685	2	U01	2/12/2014	27,2213	14	1800	19/11/2014 14:33	20/11/2014 20:47
2112639	YP575W685	3	T09	2/12/2014	69,904111	4	400	9/12/2014 19:04	12/12/2014 22:58
2112639	YP575W685	3	T11	2/12/2014	403,0243	1	1400	20/11/2014 20:47	7/12/2014 21:48
2112639	YP575W685	4	A01	2/12/2014	14,7915	23	1800	12/12/2014 22:58	13/12/2014 14:16
2112650	VQ565O678	1	H03	3/12/2014	23,4251	2	744	2/11/2014 5:28	3/11/2014 6:53
2112650	VQ565O678	2	U01	3/12/2014	8,0368	7	744	6/11/2014 19:41	7/11/2014 6:43
2112650	VQ565O678	3	T19	3/12/2014	41,11406	4	148	29/11/2014 19:09	1/12/2014 15:16
2112650	VQ565O678	3	T10	3/12/2014	140,4113	2	595	15/11/2014 6:30	21/11/2014 8:54
2112650	VQ565O678	4	A01	3/12/2014	6,5915	13	744	1/12/2014 16:32	1/12/2014 23:38
2112658	US965T695	1	H03	16/12/2014	49,0088	4	1693	6/11/2014 2:52	8/11/2014 5:52
2112658	US965T695	2	U02	16/12/2014	22,173	13	1693	15/11/2014 3:26	16/11/2014 4:36
2112658	US965T695	3	T02	16/12/2014	18,23665	5	84	3/12/2014 15:53	4/12/2014 16:07
2112658	US965T695	3	T05	16/12/2014	40,611389	3	169	11/12/2014 19:17	13/12/2014 17:54
2112658	US965T695	3	T04	16/12/2014	649,1903	1	1439	16/11/2014 4:36	13/12/2014 11:47
2112665	VQ575O688	1	H04	13/12/2014	79,7009	11	2102	14/11/2014 6:56	17/11/2014 14:38
2112665	VQ575O688	2	U01	13/12/2014	23,423	13	2102	17/11/2014 14:38	18/11/2014 17:03
2112665	VQ575O688	3	T14	13/12/2014	57,201195	3	315	6/12/2014 20:41	9/12/2014 11:53
2112665	VQ575O688	3	T05	13/12/2014	404,4042	2	1786	24/11/2014 16:53	11/12/2014 19:17
2112665	VQ575O688	4	A01	13/12/2014	16,1061	22	2102	11/12/2014 19:17	12/12/2014 11:36
2123384	VQ595O676	1	H04	3/12/2014	47,775	7	1260	7/11/2014 3:16	9/11/2014 3:03
2123384	VQ595O676	2	U02	3/12/2014	16,6775	7	1260	9/11/2014 3:03	9/11/2014 22:43
2123384	VQ595O676	3	T03	3/12/2014	236,1673	3	1260	20/11/2014 1:44	30/11/2014 3:54
2123384	VQ595O676	4	A01	3/12/2014	9,7867	11	1260	30/11/2014 16:08	1/12/2014 2:07
2123389	RQ675U577	1	H03	23/11/2014	65,9742	3	1750	3/11/2014 6:53	6/11/2014 2:52
2123389	RQ675U577	2	U02	23/11/2014	23,1632	12	1750	14/11/2014 1:16	15/11/2014 3:26
2123389	RQ675U577	3	T14	23/11/2014	375,5581	2	1750	20/11/2014 23:07	6/12/2014 20:41
2123389	RQ675U577	4	A01	23/11/2014	16,0043	20	1750	6/12/2014 20:41	7/12/2014 13:11
2123412	VQ595O697	1	H04	18/11/2014	16,9524	4	630	3/11/2014 13:52	4/11/2014 8:50
2123412	VQ595O697	2	U02	18/11/2014	9,1329	3	630	4/11/2014 8:50	4/11/2014 20:58
2123412	VQ595O697	3	T16	18/11/2014	133,6802	2	630	9/11/2014 9:50	15/11/2014 5:30
2123412	VQ595O697	4	A01	18/11/2014	4,0137	6	630	18/11/2014 1:22	18/11/2014 5:53
2123422	VQ665O696	1	H03	10/12/2014	33,1616	5	625	8/11/2014 5:52	9/11/2014 17:02
2123422	VQ665O696	2	U01	10/12/2014	8,5926	15	625	20/11/2014 20:47	21/11/2014 8:22

TRABAJO	REFERENCIA	ET	MÁQUNIA	PLAZO ENTREGA	TIEMPO PROCESO	ORDEN	KGS	INICIO	FIN
2123422	VQ665O696	3	T01	10/12/2014	130,441	3	625	6/12/2014 15:31	12/12/2014 7:57
2123425	VS778X685	1	H04	22/11/2014	20,233	3	760	2/11/2014 15:39	3/11/2014 13:52
2123425	VS778X685	2	U01	22/11/2014	10,3146	4	760	3/11/2014 13:52	4/11/2014 3:11
2123425	VS778X685	3	T19	22/11/2014	154,1707	2	760	11/11/2014 4:00	17/11/2014 20:11
2123425	VS778X685	4	A01	22/11/2014	4,684	5	760	17/11/2014 20:11	18/11/2014 1:22
2123437	VX695T686	2	U01	26/11/2014	13,3516	1	1009	30/10/2014 0:00	30/10/2014 16:21
2123437	VX695T686	3	T16	26/11/2014	227,4818	1	1009	30/10/2014 16:21	9/11/2014 9:50
2123437	VX695T686	4	A01	26/11/2014	6,2869	1	1009	9/11/2014 9:50	9/11/2014 16:37
2123439	RU695Q696	2	U02	6/12/2014	23,1752	11	1808	12/11/2014 23:05	14/11/2014 1:16
2123439	RU695Q696	3	T06	6/12/2014	291,5109	2	1808	21/11/2014 21:29	4/12/2014 6:59
2123439	RU695Q696	4	A01	6/12/2014	16,2723	17	1808	4/12/2014 20:34	5/12/2014 13:20
2123444	YP965W658	1	H04	30/11/2014	29,4412	5	1000	4/11/2014 8:50	5/11/2014 16:16
2123444	YP965W658	2	U01	30/11/2014	11,0271	5	1000	5/11/2014 16:16	6/11/2014 6:18
2123444	YP965W658	3	T16	30/11/2014	334,004	3	1000	15/11/2014 5:30	29/11/2014 9:31
2123444	YP965W658	4	A01	30/11/2014	8,591	8	1000	29/11/2014 9:31	29/11/2014 18:36
2123466	OP675X695	1	H02	20/11/2014	31,7778	3	840	2/11/2014 13:18	3/11/2014 23:05
2123466	OP675X695	2	U02	20/11/2014	11,1183	6	840	7/11/2014 21:02	8/11/2014 11:09
2123466	OP675X695	3	T02	20/11/2014	204,9012	2	840	10/11/2014 23:59	19/11/2014 13:53
2123468	RY665P675	1	H04	17/11/2014	31,5593	9	1135	11/11/2014 4:20	12/11/2014 13:53
2123468	RY665P675	2	U01	17/11/2014	12,7821	10	1135	12/11/2014 13:53	13/11/2014 5:40
2123468	RY665P675	3	T05	17/11/2014	269,2145	1	1135	13/11/2014 5:40	24/11/2014 16:53
2123468	RY665P675	4	A01	17/11/2014	8,1463	18	1135	5/12/2014 13:20	5/12/2014 21:59
2123475	VQ595O676	1	H04	3/01/2015	23,8875	13	630	19/11/2014 14:33	20/11/2014 16:26
2123475	VQ595O676	2	U02	3/01/2015	8,3388	15	630	20/11/2014 16:26	21/11/2014 3:47
2123475	VQ595O676	3	T07	3/01/2015	124,7184	1	630	21/11/2014 3:47	26/11/2014 14:30
2123475	VQ595O676	4	A01	3/01/2015	4,8934	25	630	14/12/2014 10:56	14/12/2014 16:20
2123479	VQ665O595	1	H02	3/12/2014	20,3328	2	637	1/11/2014 14:58	2/11/2014 13:18
2123479	VQ665O595	2	U02	3/12/2014	7,8352	4	637	4/11/2014 20:58	5/11/2014 7:48
2123479	VQ665O595	3	T03	3/12/2014	180,0412	2	637	12/11/2014 7:41	20/11/2014 1:44
2123479	VQ665O595	4	A01	3/12/2014	5,6435	7	637	20/11/2014 1:44	20/11/2014 7:34
2123512	PP975X579	2	U01	5/12/2014	22,5637	8	1897	7/11/2014 6:43	8/11/2014 8:17
2123512	PP975X579	3	T02	5/12/2014	142,24826	4	379	27/11/2014 11:38	3/12/2014 15:53
2123512	PP975X579	3	T10	5/12/2014	22,613725	4	94	2/12/2014 12:37	3/12/2014 17:14
2123512	PP975X579	3	T09	5/12/2014	280,2542	1	1422	8/11/2014 8:17	20/11/2014 6:32
2123512	PP975X579	4	A01	5/12/2014	15,3659	16	1897	4/12/2014 4:42	4/12/2014 20:34
2123514	OP675X695	1	H02	3/12/2014	31,7778	1	840	31/10/2014 7:12	1/11/2014 14:58
2123514	OP675X695	2	U02	3/12/2014	11,1183	1	840	1/11/2014 14:58	2/11/2014 5:05
2123514	OP675X695	3	T02	3/12/2014	204,9012	1	840	2/11/2014 5:05	10/11/2014 23:59
2123525	PP575U655	1	H01	17/12/2014	70,3585	5	2205	8/11/2014 12:42	11/11/2014 13:03
2123525	PP575U655	2	U02	17/12/2014	37,83	14	2205	16/11/2014 4:36	17/11/2014 21:26
2123525	PP575U655	3	T01	17/12/2014	311,5446	2	2205	23/11/2014 9:58	6/12/2014 15:31
2123525	PP575U655	4	A01	17/12/2014	20,1718	24	2205	13/12/2014 14:16	14/12/2014 10:56

Bibliografía

Aguilar Sánchez, A., & Sánchez Castelló, J. M. (2009). Estudio para la implantación de un ERP en una empresa textil.

Alarcón Valero, F., García Sabater, J. P., Ortiz Bas, A., & Alemany Díaz, M. del M. (2001). Modelo de programación/secuenciación de producción para un sistema de taller de flujo con diferentes requerimientos según etapas. In *IV Congreso de Ingeniería de Organización*.

Aldowaisan, T. (2001). A new heuristic and dominance relations for no-wait flowshops with setups. *Computers & Operations Research*, *28*(6), 563–584.

Al-Khayyal, F., Griffin, P. M., & Smith, N. R. (2001). Solution of a large-scale two-stage decision and scheduling problem using decomposition. *European Journal of Operational Research*, *132*(2), 453–465.

Allahverdi, A., Gupta, J. N. ., & Aldowaisan, T. (1999). A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega*, *27*(2), 219–239. doi:10.1016/S0305-0483(98)00042-5

Allahverdi, A., Ng, C. T., Cheng, T. C. E., & Kovalyov, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, *187*(3), 985–1032. doi:10.1016/j.ejor.2006.06.060

Allaoui, H., & Artiba, A. (2004). Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints. *Computers & Industrial Engineering*, *47*(4), 431–450. doi:10.1016/j.cie.2004.09.002

Allaoui, H., & Artiba, A. (2006). Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints. *Computers & Operations Research*, *33*(5), 1399–1419. doi:10.1016/j.cor.2004.09.034

Allaoui, H., Lamouri, S., & Lebbar, M. (2006). A robustness framework for a stochastic hybrild flow shop to minimize the makespan. In *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on* (Vol. 2, pp. 1097–1102). IEEE.

Álvarez Martínez, D., Ocampo, T., Mirledy, E., & Gallego Rendón, R. A. (2009). A Computational Study Solving the Flow Shop Problem with Annealing-Based Heuristics. *Ingeniería Y Desarrollo*, (25), 154–179.

Amin-Naseri, M. R., & Beheshti-Nia, M. A. (2009). Hybrid flow shop scheduling with parallel batching. *International Journal of Production Economics*, *117*(1), 185–196.

doi:10.1016/j.ijpe.2008.10.009

Andrés, C., Gomez, P., & Garcia-Sabater, J. P. (2006). Comparing dispatching rules in dynamic hybrid flow shops. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2006. ETFA'06. IEEE Conference on* (pp. 233–239). IEEE.

Ang, A. T. H., Iyer, A., & Qi, C. (2009). Criteria selection and analysis for single machine dynamic on-line scheduling with multiple objectives and sequence-dependent setups. *Computers & Industrial Engineering*, *56*(4), 1223–1231. doi:10.1016/j.cie.2008.07.018

Ángel-bello, F., Álvarez, A., Pacheco, J., & Martínez, I. (2011a). A heuristic approach for a scheduling problem with periodic maintenance and sequence-dependent setup times. *Computers and Mathematics with Applications*, *61*(4), 797–808. doi:10.1016/j.camwa.2010.12.028

Ángel-bello, F., Álvarez, A., Pacheco, J., & Martínez, I. (2011b). A single machine scheduling problem with availability constraints and sequence-dependent setup costs, *35*, 2041–2050. doi:10.1016/j.apm.2010.11.017

Anglani, A., Grieco, A., Guerriero, E., & Musmanno, R. (2005). Robust scheduling of parallel machines with sequence-dependent set-up costs. *European Journal of Operational Research*, *161*(3), 704–720.

Arango, J. a, Giraldo, J. a, & Castrillón, O. D. (2013). Programación de Máquinas Paralelas no Relacionadas con Tiempos de Montaje dependientes de la Secuencia y Entrada Dinámica usando Algoritmos Genéticos. *Información Tecnológica*, *24*(3), 73–84. doi:10.4067/S0718-07642013000300009

Arango Marín, J. A., Giraldo García, J. A., & Castrillón-gómez, O. D. (2015). Programación Detallada de Producción Textil en un Entorno Realista Usando Algoritmo Genético Modificado. In *XiV Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática CISCI 2015*. Orlando, Florida (Estados Unidos de América).

Arango Serna, M. D., Pérez O., G., & Álvarez Uribe, K. C. (2009). MODELO EMPIRICO DE GESTIÓN PARA LA CADENA DE SUMINISTRO EN EL SECTOR TEXTIL - CONFECCIÓN DE MEDELLÍN. In *Latinoamérica: Una Comunidad que Aprende Dinámica de Sistemas y con Dinámica de Sistemas*.

Arango-marín, J. A., Giraldo-garcía, J. A., & Castrillón-gómez, O. D. (2014). Applying TOC Heuristics to Job Scheduling in a Hybrid Flexible Flow Shop. *Dyna*, *81*(186), 113–119.

Armentano, V. A., & de Franca Filho, M. F. (2007). Minimizing total tardiness in parallel machine scheduling with setup times: An adaptive memory-based GRASP approach. *European Journal of Operational Research*, *183*(1), 100–114.

Arroyo, J. E. C., Nunes, G. V. P., & Kamke, E. H. (2009). Iterative local search heuristic for the single machine scheduling problem with sequence dependent setup times and due dates. In *Hybrid Intelligent Systems, 2009. HIS'09. Ninth International Conference on* (Vol. 1, pp. 505–510). IEEE.

Aryanezhad, M. B., Talebi, S., & Karimi-nasab, M. (2010). A New Approach for Production Scheduling with Compressible Processing Times, (1).

Attar, S. F., Mohammadi, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). Hybrid flexible flowshop scheduling problem with unrelated parallel machines and limited waiting times. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *68*(5-8), 1583–1599. Retrieved from http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-013-4956-3

Attar, S. F., Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Yaghoubi, S. (2013). Solving a new multi-objective hybrid flexible flowshop problem with limited waiting times and machine-sequence-dependent set-up time constraints. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *27*(5), 450–469. doi:10.1080/0951192X.2013.820348

Azadeh, A., Ghaderi, S. F., Dehghanbaghi, M., & Dabbaghi, A. (2010). Integration of simulation, design of experiment and goal programming for minimization of makespan and tardiness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *46*(5-8), 431–444.

Ballesteros Silva, P. P., Ballesteros Riveros, D. P., & Bernal Loaiza, M. E. (2006). Programación disyuntiva para n tareas en m máquinas en producción por pedidos. *Scientia et Technica*, *1*(30).

Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Zandieh, M. (2010). Development of a hybrid metaheuristic to minimise earliness and tardiness in a hybrid flowshop with sequence-dependent setup times. *International Journal of Production Research*, *48*(5), 1415–1438.

Behnamian, J., Zandieh, M., & Ghomi, S. M. T. F. (2009). Parallel-machine scheduling problems with sequence-dependent setup times using an ACO , SA and VNS hybrid algorithm. *Expert Systems With Applications*, *36*(6), 9637–9644. doi:10.1016/j.eswa.2008.10.007

Beraldi, P., Ghiani, G., Grieco, A., & Guerriero, E. (2008). Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the parallel machine lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up costs. *Computers & Operations Research*, *35*(11), 3644–3656. doi:10.1016/j.cor.2007.04.003

Beraldi, P., Ghiani, G., Guerriero, E., & Grieco, A. (2006). Scenario-based planning for lot-sizing and scheduling with uncertain processing times. *International Journal of Production Economics*, *101*(1), 140–149. doi:10.1016/j.ijpe.2005.05.018

Berkoune, D., Mesghouni, K., & Rabenasolo, B. (2006). Resolution approach for multiobjective scheduling problems with uncertain demands. In *Computational Engineering in Systems Applications, IMACS Multiconference on* (Vol. 2, pp. 1465–1472). IEEE.

Bertel, S., & Billaut, J.-C. (2004). A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flow shop scheduling problem with recirculation. *European Journal of Operational Research*, *159*(3), 651–662.

Bollapragada, R., Della, F., & Ghirardi, M. (2011). Discrete-time , economic lot scheduling problem on multiple , non-identical production lines. *European Journal of Operational Research*, *215*(1), 89–96. doi:10.1016/j.ejor.2011.05.053

Botta-Genoulaz, V. (1997). Considering bills of material in hybrid flow shop scheduling problems. In *Assembly and Task Planning, 1997. ISATP 97., 1997 IEEE International Symposium on* (pp. 194–199). IEEE.

Botta-Genoulaz, V. (2000). Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness. *International Journal of Production Economics*, *64*(1), 101–111.

Bowers, M. R., & Agarwal, A. (2007). Fewer Equipment Changeovers for the Embroidery Process at Oxford Industries. *Interfaces*, *37*(6), 526–538.

Bozorgirad, M. A., & Logendran, R. (2013). Bi-criteria group scheduling in hybrid flowshops. *International Journal of Production Economics*, *145*(2), 599–612. doi:10.1016/j.ijpe.2013.05.015

Caricato, P., Grieco, A., & Nucci, F. (2008). Simulation and mathematical programming for a multi-objective configuration problem in a hybrid flow shop. In *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation* (pp. 1820–1828). Winter Simulation Conference.

Caricato, P., Grieco, A., & Serino, D. (2007). Tsp-based scheduling in a batch-wise hybrid flow-shop. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *23*(2), 234–241. doi:10.1016/j.rcim.2005.12.004

Carpov, S., Carlier, J., Nace, D., & Sirdey, R. (2012). Two-stage hybrid flow shop with precedence constraints and parallel machines at second stage. *Computers & Operations Research*, *39*(3), 736–745. doi:10.1016/j.cor.2011.05.020

Carreno, J. J. (1990). Economic lot scheduling for multiple products on parallel identical processors. *Management Science*, *36*(3), 348–358.

Cevikcan, E., Durmusoglu, M. B., & Baskak, M. (2011). Expert Systems with Applications Integrating parts design characteristics and scheduling on parallel machines. *Expert Systems With Applications*, *38*(10), 13232–13253. doi:10.1016/j.eswa.2011.04.140

Chang, P., Chen, S., & Fan, C. (2009). A hybrid electromagnetism-like algorithm for single machine scheduling problem. *Expert Systems With Applications*, *36*(2), 1259–1267. doi:10.1016/j.eswa.2007.11.050

Chang, P.-C., & Chen, S.-H. (2011). Integrating dominance properties with genetic algorithms for parallel machine scheduling problems with setup times. *Applied Soft Computing*, *11*(1), 1263–1274. doi:10.1016/j.asoc.2010.03.003

Chang, P.-C., Hsieh, J.-C., & Wang, Y.-W. (2003). Genetic algorithms applied in BOPP film scheduling problems: minimizing total absolute deviation and setup times. *Applied Soft Computing*, *3*(2), 139–148.

Chen, P., Wu, C. C., & Lee, W. C. (2006). A bi-criteria two-machine flowshop scheduling problem with a learning effect. *Journal of the Operational Research Society*, *57*(9), 1113–1125.

Chen, W. J. (2007). Scheduling of jobs and maintenance in a textile company. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *31*(7-8), 737–742.

Chen, W. J. (2009). Scheduling with dependent setups and maintenance in a textile company. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(3), 867–873. doi:10.1016/j.cie.2009.03.001

Chen, W.-J., & Liao, C.-J. (2005). Scheduling with different maintenance policies in a textile company. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *11*(1), 43–52.

Cheng, T. C. E., Cheng, S., Wu, W., Hsu, P., & Wu, C. (2011). A two-agent single-machine scheduling problem with truncated sum-of-processing-times-based learning considerations q. *Computers & Industrial Engineering*, *60*(4), 534–541. doi:10.1016/j.cie.2010.12.008

Cheng, T. C. E., Hsu, C., Huang, Y., & Lee, W. (2011). Single-machine scheduling with deteriorating jobs and setup times to minimize the maximum tardiness. *Computers and Operation Research*, *38*(12), 1760–1765. doi:10.1016/j.cor.2010.11.014

Cho, H., Bae, S., Kim, J., & Jeong, I. (2011). Bi-objective scheduling for reentrant hybrid flow shop using Pareto genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, *61*(3), 529–541. doi:10.1016/j.cie.2011.04.008

Choi, H., Kim, J., & Lee, D.-H. (2011). Real-time scheduling for reentrant hybrid flow shops: A decision tree based mechanism and its application to a TFT-LCD line. *Expert Systems with Applications*, *38*(4), 3514–3521. doi:10.1016/j.eswa.2010.08.139

Choi, H.-S., & Lee, D.-H. (2009). Scheduling algorithms to minimize the number of tardy jobs in two-stage hybrid flow shops. *Computers & Industrial Engineering*, *56*(1), 113–120. doi:10.1016/j.cie.2008.04.005

Choi, S., & Kim, Y. (2009). Minimizing total tardiness on a two-machine re-entrant flowshop. *European Journal of Operational Research*, *199*(2), 375–384. doi:10.1016/j.ejor.2008.11.037

Choi, S.-W., & Kim, Y.-D. (2007). Minimizing makespan on a two-machine re-entrant flowshop. *Journal of the Operational Research Society*, *58*(7), 972–981.

Choobineh, F. F., Mohebbi, E., & Khoo, H. (2006). A multi-objective tabu search for a single-machine scheduling problem with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, *175*(1), 318–337.

Choong, F., Phon-Amnuaisuk, S., & Alias, M. Y. Y. (2011). Metaheuristic methods in hybrid flow shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, *38*(9), 10787–10793. doi:10.1016/j.eswa.2011.01.173

Chyu, C.-C., & Chang, W. (2010). A Pareto evolutionary algorithm approach to bi-objective unrelated parallel machine scheduling problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *49*(5-8), 697–708. doi:10.1007/s00170-009-2419-7

Cidetexco. (2003). *La Globalización de la Cadena Fibra Textil Confección. Retos y desafios. Informe Final*.

Colorni, A., Dorigo, M., Maffioli, F., Maniezzo, V., Righini, G., & Trubian, M. (1996). Heuristics from Nature for Hard Combinatorial Optimization Problems. *International Transactions in Operational Research*, *3*(1), 1–21. doi:10.1111/j.1475-3995.1996.tb00032.x

Companys, R., & D'Armas, M. (2005). Programación de operaciones con tiempos de preparación mediante algoritmos de optimización local. *Universidad, Ciencia Y Tecnología*, *9*(35), 155–162. Retrieved from http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212005000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Cui, Z., & Gu, X. (2015). An improved discrete artificial bee colony algorithm to minimize the makespan on hybrid flow shop problems. *Neurocomputing*, *148*(0), 248–259. doi:10.1016/j.neucom.2013.07.056

Daly, J. S., Cassidy, B. D., & Kulasiri, G. D. (1995). A simulation model of woollen system carpet yarn manufacture for production planning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, *12*(3), 249–260.

De Siqueira, E. C., de Souza, S. R., & Souza, M. J. F. (2012). UM ALGORITMO BASEADO EM ITERATED GREEDY PARA MINIMIZAÇÃO DO MAKESPAN NO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO FLOWSHOP HÍBRIDO E FLEXÍVEL.

De Siqueira, E. C., Souza, M. J. F., De Souza, S. R., De Franca Filho, M. F., & Marcelino, C. G. (2013). An algorithm based on Evolution Strategies for makespan minimization in hybrid flexible flowshop scheduling problems. *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2013*, 989–996. doi:10.1109/CEC.2013.6557675

Defersha, F. (2011). A comprehensive mathematical model for hybrid flexible flowshop lot streaming problem. *International Journal of Industrial Engineering* …. Retrieved from http://www.growingscience.com/ijiec/metadata/j.ijiec.2010.07.006.html

Defersha, F., & Chen, M. (2012). Mathematical model and parallel genetic algorithm for hybrid flexible flowshop lot streaming problem. *The International Journal of Advanced* …. Retrieved from http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3798-0

Defersha, F. M., & Chen, M. (2010). A hybrid genetic algorithm for flowshop lot streaming with setups and variable sublots. *International Journal of Production Research*, *48*(6), 1705–1726. doi:10.1080/00207540802660544

DNP. (2007). *Agenda Interna para la Productividad y competitividad Algodon, Fibras, Textiles y Confecciones*.

Driessel, R., & Mönch, L. (2011). Variable neighborhood search approaches for scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times , precedence constraints , and ready times. *Computers & Industrial Engineering*, *61*(2), 336–345. doi:10.1016/j.cie.2010.07.001

Dugardin, F., Amodeo, L., & Yalaoui, F. (2009). Multiobjective scheduling of a reentrant hybrid flowshop. In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on* (pp. 193–195). IEEE.

Dugardin, F., Yalaoui, F., & Amodeo, L. (2010). New multi-objective method to solve reentrant hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, *203*(1), 22–31.

Engin, O., Ceran, G., & Yilmaz, M. K. (2011). An efficient genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor task problems. *Applied Soft Computing*, *11*(3), 3056–3065. doi:10.1016/j.asoc.2010.12.006

Engin, O., & Döyen, A. (2004). A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system. *Computational Science of Lattice Boltzmann Modelling*, *20*(6), 1083–1095. doi:10.1016/j.future.2004.03.014

Escorcia, A., & Duque, G. (2004). Comportamiento del sector de textiles y confecciones en Colombia.

Fang, Z. (2009). An improved weight-based multiobjective genetic algorithm and its application to parallel machine scheduling. In *Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA'09. Second International Conference on* (Vol. 1, pp. 161–164). IEEE.

Fattahi, P., Tavakoli, N. B., Jalilvand-Nejad, A., & Jolai, F. (2010). A hybrid algorithm to solve the problem of re-entrant manufacturing system scheduling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *3*(4), 268–278. doi:10.1016/j.cirpj.2011.01.001

Feng, H., Lu, S., & Li, X. (2009). Genetic Algorithm for Hybrid Flow-shop Scheduling with Parrel Batch Processors, 9–13. doi:10.1109/ICIE.2009.87

Ferretti, I., Zanoni, S., & Zavanella, L. (2006). Production–inventory scheduling using Ant System metaheuristic. *International Journal of Production Economics*, *104*(2), 317–326.

Figielska, E. (2007). A linear programming based heuristic for solving a two-stage flowshop scheduling problem. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2007. ETFA. IEEE Conference on* (pp. 392–397). IEEE.

Figielska, E. (2008). A new heuristic for scheduling the two-stage flowshop with additional resources. *Computers & Industrial Engineering*, *54*(4), 750–763.

Figielska, E. (2009). A genetic algorithm and a simulated annealing algorithm combined with column generation technique for solving the problem of scheduling in the hybrid flowshop with additional resources. *Computers & Industrial Engineering*, *56*(1), 142–151. doi:10.1016/j.cie.2008.04.008

Frendewey, J. O., & Sumichrast, R. T. (1988). Scheduling parallel processors with setup costs and resource limitations. *Decision Sciences*, *19*(1), 138–146.

Gacias, B., Artigues, C., & Lopez, P. (2010). Parallel machine scheduling with precedence constraints and setup times. *Computers and Operation Research*, *37*(12), 2141–2151. doi:10.1016/j.cor.2010.03.003

Gagné, C., Price, W. L., & Gravel, M. (2002). Comparing an ACO algorithm with other heuristics for the single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times. *Journal of the Operational Research Society*, 895–906.

Gallego, R. A., Escobar, A., & Romero, R. (2006). *Técnicas de optimización combinatorial*. Universidad Tecnológica de Pereira.

Gao, C., & Tang, L. (2007). Scheduling hybrid flow shop for minimizing total weight completion time. In *Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 809–813). IEEE.

Gao, J. (2010). A novel artificial immune system for solving multiobjective scheduling problems subject to special process constraint. *Computers & Industrial Engineering*, *58*(4), 602–609. doi:10.1016/j.cie.2009.12.009

Gao, J., He, G., & Wang, Y. (2008a). Research on Immune Genetic Algorithm for Solving Bi-Objective Scheduling Problems Subjected to Special Process Constraint, (September), 1994–1999.

Gao, J., He, G., & Wang, Y. (2008b). Research on immune genetic algorithm for solving bi-objective scheduling problems subjected to special process constraint. In

Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on (pp. 1994–1999). IEEE.

Gao, J., He, G., Wang, Y., & Liu, F. (2008). Multi-objective scheduling problems subjected to special process constraint. In *Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on* (pp. 105–110). IEEE.

Gendreau, M., Laporte, G., & Guimarães, E. M. (2001). A divide and merge heuristic for the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, *133*(1), 183–189.

Gharehgozli, A. H., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Zaerpour, N. (2009). A fuzzy-mixed-integer goal programming model for a parallel-machine scheduling problem with sequence-dependent setup times and release dates. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *25*(4), 853–859.

Gholami, M., Zandieh, M., & Alem-Tabriz, A. (2009). Scheduling hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *42*(1-2), 189–201.

Gicquel, C., Hege, L., Minoux, M., Canneyt, W. Van, & van Canneyt, W. (2012). A discrete time exact solution approach for a complex hybrid flow-shop scheduling problem with limited-wait constraints. *Computers & Operations Research*, *39*(3), 629–636. doi:10.1016/j.cor.2011.02.017

Gómez Gasquet, P. (2010, May 3). *Programación de la producción en un taller de flujo híbrido sujeto a incertidumbre: arquitectura y algoritmos. Aplicación a la industria cerámica*. Universidad Politécnica de Valencia. Retrieved from http://riunet.upv.es/handle/10251/7728

Gómez Gasquet, P., & García Sabater, J. P. (2005). Aplicación del Modelado de Sistemas Multiagente al problema de la programación de la producción en la industria cerámica. In *IX Congreso de Ingeniería de Organización: Gijón, 8-9 Septiembre de 2005* (p. 190).

Gómez Gasquet, P., García Sabater, J. P., & Romano, C. A. (2005). Desarrollo de Sistemas Multiagente para el Problema Dinámico de la Programación de Producción y Control de Procesos en Línea en la Industria Cerámica*. In *IX Congreso de Ingeniería de Organización* (p. 187).

Gómez, P. (2007). Un nuevo Algoritmo Genético Basado en un Sistema Multiagente para la Programación de la Producción en un Taller de Flujo Híbrido. In *XI Congreso de Ingeniería de Organización* (pp. 1675–1685).

González Palacio, Á., Castrillón-gómez, O. D., & Arango-marín, J. A. (2013). Programación de un Flow Shop Híbrido con Tiempos de Montaje Dependientes de la Secuencia y Máquinas Paralelas no Relacionadas Usando Métodos Aleatorios. In *XXXIV Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa SEIO 2013* (pp. 48–49).

Grabowski, J., & Pempera, J. (2000). Sequencing of jobs in some production system. *European Journal of Operational Research*, *125*(3), 535–550. doi:10.1016/S0377-2217(99)00224-6

Guinet, A. (1991). Textile production systems: a succession of non-identical parallel processor shops. *Journal of the Operational Research Society*, 655–671.

Guo, Z. X., Wong, W. K., Leung, S. Y. S., Fan, J. T., & Chan, S. F. (2008). A genetic-algorithm-based optimization model for scheduling flexible assembly lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *36*(1-2), 156–168.

Gupta, J. N. D., Krüger, K., Lauff, V., Werner, F., & Sotskov, Y. N. (2002). Heuristics for hybrid flow shops with controllable processing times and assignable due dates. *Computers & Operations Research*, *29*(10), 1417–1439. doi:10.1016/S0305-0548(01)00040-5

Gupta, S. R., & Smith, J. S. (2006). Algorithms for single machine total tardiness scheduling with sequence dependent setups. *European Journal of Operational Research*, *175*(2), 722–739. doi:10.1016/j.ejor.2005.05.018

Han, Z., Shi, H., Qiao, F., & Yue, L. (2011). DE Solution for the Earliness/Tardiness Case of Hybrid Flow-shop Scheduling Problem with Priority Strategy, 12–17.

Haouari, M., Hidri, L., & Gharbi, A. (2006). Optimal scheduling of a two-stage hybrid flow shop. *Mathematical Methods of Operations Research*, *64*(1), 107–124.

Harjunkoski, I., Nyström, R., & Horch, A. (2009). Integration of scheduling and control—Theory or practice? *Computers & Chemical Engineering*, *33*(12), 1909–1918.

Hekmatfar, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Karimi, B. (2011). Two stage reentrant hybrid flow shop with setup times and the criterion of minimizing makespan. *Applied Soft Computing*, *11*(8), 4530–4539. doi:10.1016/j.asoc.2011.08.013

Hentous, H., & Benhammadi, F. (2006). Heuristics Resolution of a Constrained Hybrid Flow Shop Problem. In *Computers and Communications, 2006. ISCC'06. Proceedings. 11th IEEE Symposium on* (pp. 532–535). IEEE.

Hentous, H., & Merabti, B. (2010). A Branch and Bound Heuristic for the Flow Shop Problem. In *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), 2010 Fourth International Conference on* (pp. 352–356). IEEE.

Hidri, L., & Haouari, M. (2011). Bounding strategies for the hybrid flow shop scheduling problem. *Applied Mathematics and Computation*, *217*(21), 8248–8263. doi:10.1016/j.amc.2011.02.108

Hmida, A. Ben, Haouari, M., Huguet, M.-J., & Lopez, P. (2011). Solving two-stage hybrid flow shop using climbing depth-bounded discrepancy search. *Computers & Industrial Engineering*, *60*(2), 320–327. doi:10.1016/j.cie.2010.11.015

Hmida, A. Ben, Haouari, M., Huguet, M.-J., Lopez, P., & Ben, A. (2011). Solving two-stage hybrid flow shop using climbing depth-bounded discrepancy search. *Computers & Industrial Engineering*, *60*(2), 320–327. doi:10.1016/j.cie.2010.11.015

Hmida, A. Ben, Huguet, M.-J., Lopez, P., & Haouari, M. (2006). Adaptation of discrepancy-based methods for solving hybrid flow shop problems. In *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on* (Vol. 2, pp. 1120–1125). IEEE.

Hojjati, S. M. H., & Sahraeyan, A. (2009). Minimizing makespan subject to budget limitation in hybrid flow shop. In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on* (pp. 18–22). IEEE.

Holthaus, O., & Rajendran, C. (1997). Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop. *International Journal of Production Economics*, *48*(1), 87–105. doi:10.1016/S0925-5273(96)00068-0

Hsu, H.-M., Hsiung, Y., Chen, Y.-Z., & Wu, M.-C. (2009). A GA methodology for the scheduling of yarn-dyed textile production. *Expert Systems with Applications*, *36*(10), 12095–12103. doi:10.1016/j.eswa.2009.04.075

Hu, Y., Ma, D., & Ye, F. (2006). Scheduling Hybrid Flow Shop Containing Multi-Functional Machines. In *Computational Intelligence and Security, 2006 International Conference on* (Vol. 1, pp. 425–428). IEEE.

Huang, W. Q., & Wang, L. (2006). A local search method for permutation flow shop scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, *57*(10), 1248–1251.

Hung, Y.-F., Shih, C.-C., & Chen, C.-P. (1999). Evolutionary algorithms for production planning problems with setup decisions. *Journal of the Operational Research Society*, 857–866.

Jabbarizadeh, F., Zandieh, M., & Talebi, D. (2009). Hybrid flexible flowshops with sequence-dependent setup times and machine availability constraints. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(3), 949–957. doi:10.1016/j.cie.2009.03.012

James, R. J. W., & Almada-lobo, B. (2011). Single and parallel machine capacitated lotsizing and scheduling : New iterative MIP-based neighborhood search heuristics. *Computers and Operation Research*, *38*(12), 1816–1825. doi:10.1016/j.cor.2011.02.005

Janiak, A., Kozan, E., Lichtenstein, M., & Oğuz, C. (2007). Metaheuristic approaches to the hybrid flow shop scheduling problem with a cost-related criterion. *Scheduling in Batch-Processing Industries and Supply Chains*, *105*(2), 407–424. doi:10.1016/j.ijpe.2004.05.027

Jenabi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Torabi, S. A., & Karimi, B. (2007). Two hybrid meta-heuristics for the finite horizon ELSP in flexible flow lines with unrelated parallel machines. *Applied Mathematics and Computation*, *186*(1), 230–245. doi:10.1016/j.amc.2006.06.121

Jin, F., Gupta, J. N. D., Song, S., & Wu, C. (2010). Single machine scheduling with sequence-dependent family setups to minimize maximum lateness, 1181–1190. doi:10.1057/jors.2009.63

Jin, F., Gupta, J. N. D., Song, S., & Wu, C. (2010). Single machine scheduling with sequence-dependent family setups to minimize maximum lateness. *Journal of the Operational Research Society*, *61*(7), 1181–1189.

Jin, F., Song, S., & Wu, C. (2009). A simulated annealing algorithm for single machine scheduling problems with family setups. *Computers & Operations Research*, *36*(7), 2133–2138.

Jinrong, Z., Dao, H., & Weisun, J. (1994). Optimization production scheduling of multi-stage interrelated discrete system via synthetic knowledge. In *American Control Conference, 1994* (Vol. 1, pp. 724–728). IEEE.

Joines, J. A., Sutton, A. B., Thoney, K., King, R. E., & Hodgson, T. J. (2003). Factory scheduling: implementing a simulation-based scheduling system for a two-plant

operation. In *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation* (pp. 1440–1448). Winter Simulation Conference.

Jouglet, A., Oğuz, C., & Sevaux, M. (2009). Hybrid flow-shop: a memetic algorithm using constraint-based scheduling for efficient search. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, *8*(3), 271–292.

Jungwattanakit, J., Reodecha, M., Chaovalitwongse, P., & Werner, F. (2009). A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria. *Scheduling for Modern Manufacturing, Logistics, and Supply Chains*, *36*(2), 358–378. doi:10.1016/j.cor.2007.10.004

Kahraman, C., Engin, O., Kaya, I., & Elif Öztürk, R. (2010). Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-shops: A parallel greedy algorithm approach. *Applied Soft Computing Journal*, *10*(5), 1293–1300. doi:10.1016/j.asoc.2010.03.008

Kalczynski, P. J., & Kamburowski, J. (2009). An empirical analysis of the optimality rate of flow shop heuristics. *European Journal of Operational Research*, *198*(1), 93–101.

Karabuk, S. (2008). Production planning under uncertainty in textile manufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, *59*(4), 510–520.

Karacapilidis, N. I., & Pappis, C. P. (1996). Production planning and control in textile industry: A case study. *Computers in Industry*, *30*(2), 127–144. doi:10.1016/0166-3615(96)00038-3

Karimi, N., Zandieh, M., & Karamooz, H. R. (2010). Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: A multi-phase approach. *Expert Systems with Applications*, *37*(6), 4024–4032. doi:10.1016/j.eswa.2009.09.005

Khalouli, S., Ghedjati, F., & Hamzaoui, A. (2008). Ant colony optimization for solving a bi-criteria hybrid flow shop problem. In *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference on* (pp. 1440–1445). IEEE.

Khalouli, S., Ghedjati, F., Hamzaoui, A., & Ã, S. K. (2010). A meta-heuristic approach to solve a JIT scheduling problem in hybrid flow shop. *Advances in Metaheuristics for Hard Optimization: New Trends and Case Studies*, *23*(5), 765–771. doi:10.1016/j.engappai.2010.01.008

Kim, D.-W., Kim, K.-H., Jang, W., & Chen, F. F. (2002). Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *18*(3), 223–231.

Kim, H. W., & Lee, D. H. (2009). Heuristic algorithms for re-entrant hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *223*(4), 433–442.

Kim, Y. (1993). Heuristics for Flowshop Scheduling Problems Minimizing Mean Tardiness. *The Journal of the Operational Research Society*, *44*(1), 19–28. doi:10.2307/2584431

Kis, T., & Kovács, A. (2012). A cutting plane approach for integrated planning and scheduling. *Computers & Operations Research*, *39*(2), 320–327. doi:10.1016/j.cor.2011.04.006

Koulamas, C., & Kyparisis, G. J. (2007). A note on the two-stage assembly flow shop scheduling problem with uniform parallel machines. *European Journal of Operational Research*, *182*(2), 945–951. doi:10.1016/j.ejor.2006.07.027

Kovács, A., Brown, K. N., & Tarim, S. A. (2009). An efficient MIP model for the capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setups. *International Journal of Production Economics*, *118*(1), 282–291.

Kurz, M. E., & Askin, R. G. (2004). Scheduling flexible flow lines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, *159*(1), 66–82. doi:10.1016/S0377-2217(03)00401-6

Lalas, C., Mourtzis, D., Papakostas, N., & Chryssolouris, G. (2005). A combinatory approach to order release and shop scheduling in discrete manufacturing environments. In *Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on* (Vol. 1, p. 8–pp). IEEE.

Lane, R., & Evans, S. (1995). Solving problems in production scheduling. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, *8*(2), 117–124. doi:10.1016/0951-5240(95)00005-E

Lee, F.-C., & Yao, M. (2003). A global optimum search algorithm for the joint replenishment problem under power-of-two policy. *Computers & Operations Research*, *30*(9), 1319–1333.

Lee, W., Lin, J., & Shiau, Y. (2011). Deteriorating job scheduling to minimize the number of late jobs with setup times q. *Computers & Industrial Engineering*, *61*(3), 782–787. doi:10.1016/j.cie.2011.05.010

Lee, Y. H., & Pinedo, M. (1997). Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, *100*(3), 464–474.

Lei, D. (2010). A genetic algorithm for flexible job shop scheduling with fuzzy processing time. *International Journal of Production Research*, *48*(10), 2995–3013.

Li, J., Pan, Q., & Duan, P. (2015). An Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Hybrid Flexible Flowshop With Dynamic Operation Skipping. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7137684

Li, Z., & Ierapetritou, M. G. (2009). Integrated production planning and scheduling using a decomposition framework. *Chemical Engineering Science*, *64*(16), 3585–3597. doi:10.1016/j.ces.2009.04.047

Lian, Z. (2010). A united search particle swarm optimization algorithm for multiobjective scheduling problem. *Applied Mathematical Modelling*, *34*(11), 3518–3526. doi:10.1016/j.apm.2010.03.001

Liao, C. J., & Chen, W. J. (2004). Scheduling under machine breakdown in a continuous process industry. *Computers & Operations Research*, *31*(3), 415–428. doi:10.1016/S0305-0548(02)00224-1

Liao, C.-J., & Juan, H. (2007). An ant colony optimization for single-machine tardiness scheduling with sequence-dependent setups. *Computers & Operations Research*, *34*(7), 1899–1909. doi:10.1016/j.cor.2005.07.020

Lin, H.-T., & Liao, C.-J. (2003). A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines. *International Journal of Production Economics*, *86*(2), 133–143. doi:10.1016/S0925-5273(03)00011-2

Lin, J. T., & Chen, C.-M. (2015). Simulation optimization approach for hybrid flow shop scheduling problem in semiconductor back-end manufacturing. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *51*, 100–114. doi:10.1016/j.simpat.2014.10.008

Lin, S., Lee, Z., Ying, K., & Lu, C. (2011). Minimization of maximum lateness on parallel machines with sequence-dependent setup times and job release dates. *Computers and Operation Research*, *38*(5), 809–815. doi:10.1016/j.cor.2010.09.020

Ling-li, Z., Feng-xing, Z., Xiao-hong, X., & Zheng, G. (2009). Dynamic Scheduling of Multi-task for Hybrid Flow-shop Based on Energy Consumption, 478–482.

Linn, R., & Zhang, W. (1999). Hybrid flow shop scheduling: A survey. *Proceedings of the 24th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, *37*(1–2), 57–61. doi:10.1016/S0360-8352(99)00023-6

Lipi, T. F., Hasin, M. A. A., & Noor-E-Alam, M. D. (2009). Reliability Centered Multi Objective Hybrid Flow Shop Scheduling. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, *26*(05), 637–653.

Liu, A., Yin, Y., & Jiang, J. (2010). Flow shop scheduling problems with general learning effect under dominant machines. doi:10.1109/CCIE.2010.78

Liu, B., Wang, L., Liu, Y., Qian, B., & Jin, Y.-H. (2010). An effective hybrid particle swarm optimization for batch scheduling of polypropylene processes. *Computers & Chemical Engineering*, *34*(4), 518–528. doi:10.1016/j.compchemeng.2009.12.010

Liu, X., Zou, F., & Zhang, X. (2008). Mathematical model and genetic optimization for hybrid flow shop scheduling problem based on energy consumption. In *Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008. Chinese* (pp. 1002–1007). IEEE.

Logendran, R., Mcdonell, B., & Smucker, B. (2007). Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups. *Computers & Operations Research*, *34*(11), 3420–3438. doi:10.1016/j.cor.2006.02.006

Lopes, M. J. P., & de Carvalho, J. M. V. (2007). A branch-and-price algorithm for scheduling parallel machines with sequence dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, *176*(3), 1508–1527.

López Rodriguez, D. (2011, November 8). Desarrollo y caraterización de hilos para la fabricación de tejidos técnicos. Retrieved from http://riunet.upv.es/handle/10251/12767

López Vargas, J. C., Giraldo García, J. A., & Arango Marín, J. A. (2015). Reducción del Tiempo de Terminación en la Programación de la Producción de una Línea de Flujo Híbrida Flexible (HFS). *Información Tecnológica*, *26*(3), 157–172.

Lu, L., Ng, C. T., & Zhang, L. (2011). Optimal algorithms for single-machine scheduling with rejection to minimize the makespan, *130*, 153–158. doi:10.1016/j.ijpe.2010.12.003

Madhushini, N., Rajendran, C., & Deepa, Y. (2009). Branch-and-bound algorithms for scheduling in permutation flowshops to minimize the sum of weighted flowtime / sum of weighted tardiness / sum of weighted flowtime and weighted tardiness / sum of

weighted flowtime , weighted tardiness and weighted earline, 991–1005. doi:10.1057/palgrave.jors.2602642

Mahdavi, I., Komaki, G. M., & Kayvanfar, V. (2011). Aggregate hybrid flowshop scheduling with assembly operations. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), 2011 IEEE 18Th International Conference on* (pp. 663–667). IEEE.

Mahdavi, I., Mojarad, M. S., Javadi, B., & Tajdin, A. (2008). A genetic approach for solving a hybrid flow shop scheduling problem. In *Industrial Engineering and Engineering Management, 2008. IEEM 2008. IEEE International Conference on* (pp. 1214–1218). IEEE.

Maravelias, C. T., & Sung, C. (2009). Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, *33*(12), 1919–1930.

Martin, C. H. (2009). A hybrid genetic algorithm/mathematical programming approach to the multi-family flowshop scheduling problem with lot streaming. *Omega*, *37*(1), 126–137.

Martínez, D. Á., Ocampo, E. T., & Rendón, R. G. (2009). Algoritmo recocido simulado aplicado al problema de secuenciamiento de tareas en sistemas de produccion lineal flow-shop. *Scientia et Technica*, *3*(40).

Mauguière, P., Billaut, J.-C., & Bouquard, J.-L. (2005). New single machine and job-shop scheduling problems with availability constraints. *Journal of Scheduling*, *8*(3), 211–231.

McCormick, S. T., & Pinedo, M. L. (1995). Scheduling n independent jobs on m uniform machines with both flowtime and makespan objectives: a parametric analysis. *ORSA Journal on Computing*, *7*(1), 63–77.

McKinsey & Company. (2009). *Desarrollando Sectores De Clase Mundial En Colombia. Informe Final: Sector Textil, Confección, Diseño Y Moda*. Bogotá. Retrieved from https://www.ptp.com.co/documentos/Plan de Negocios Textiles y Confecciones.pdf

Mesghouni, K., & Rabenasolo, B. (2002). Multi-period predictive production scheduling with uncertain demands. In *Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on* (Vol. 6, p. 6–pp). IEEE.

Min, L., & Cheng, W. (2006). Genetic algorithms for the optimal common due date assignment and the optimal scheduling policy in parallel machine earliness/tardiness scheduling problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *22*(4), 279–287.

Mirabi, M. (2014). A novel hybrid genetic algorithm to solve the sequence-dependent permutation flow-shop scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *71*(1-4), 429–437. Retrieved from 10.1007/s00170-013-5489-5

Mirsanei, H. S., Zandieh, M., Moayed, M. J., & Khabbazi, M. R. (2011). A simulated annealing algorithm approach to hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *22*(6), 965–978.

Moccellin, J. V., & Nagano, M. S. (2007). Uma propriedade estrutural do problema de

programação da produção flow shop permutacional com tempos de setup. *Pesquisa Operacional*, *27*(3), 487–515.

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. *Limusa Wiley*. Retrieved from http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=juiga.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=001087

Montoya-torres, E. L. S. J. R., & Paternina-arboleda, C. D. (2009). Ant colony optimization algorithm for a Bi-criteria 2-stage hybrid flowshop scheduling problem, (1991). doi:10.1007/s10845-009-0370-y

Morais, M. de F., & Moccellin, J. V. (2010). Constructive heuristics methods to minimizing work in process in environment production hybrid flow shop with asymmetric sequence dependent setup times. *Gestão & Produção*, *17*(2), 367–375.

Mosheiov, G., & Yovel, U. (2004). Comments on “Flow shop and open shop scheduling with a critical machine and two operations per job.” *European Journal of Operational Research*, *157*(1), 257–261.

Muñoz, F. T., Moraga, R. J., & Baesler, F. F. (2005). Look-Ahead Constructive Heuristic for the Unrelated Parallel Machine Problem with Sequence Dependent Setup Times. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1). Institute of Industrial Engineers-Publisher.

Murata, T., & Ishibuchi, H. (1996). Positive and negative combination effects of crossover and mutationoperators in sequencing problems. *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 170–175. doi:10.1109/ICEC.1996.542355

Naderi, B., Gohari, S., & Yazdani, M. (2014). Hybrid flexible flowshop problems: Models and solution methods. *Applied Mathematical Modelling*, *38*(24), 5767–5780. doi:10.1016/j.apm.2014.04.012

Naderi, B., Ruiz, R., & Zandieh, M. (2010). Algorithms for a realistic variant of flowshop scheduling. *Computers & Operations Research*, *37*(2), 236–246. doi:10.1016/j.cor.2009.04.017

Naderi, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Khalili, M. (2010). Electromagnetism-like mechanism and simulated annealing algorithms for flowshop scheduling problems minimizing the total weighted tardiness and makespan. *Knowledge-Based Systems*, *23*(2), 77–85. doi:10.1016/j.knosys.2009.06.002

Naderi, B., Zandieh, M., & Roshanaei, V. (2009). Scheduling hybrid flowshops with sequence dependent setup times to minimize makespan and maximum tardiness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *41*(11-12), 1186–1198. doi:10.1007/s00170-008-1569-3

Néron, E., Baptiste, P., & Gupta, J. N. . (2001). Solving hybrid flow shop problem using energetic reasoning and global operations. *Omega*, *29*(6), 501–511. doi:10.1016/S0305-0483(01)00040-8

Ng, C. T., Matsveichuk, N. M., Sotskov, Y. N., & Cheng, T. C. E. (2009). Two-machine flow-shop minimum-length scheduling with interval processing times. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, *26*(06), 715–734.

Niccolò, V. (2011). *ANALYSIS OF THE PRODUCTION SCHEDULING METHODS INTO*

HYBRID FLOW SHOP ENVIRONMENTS. University of Padua.

Noorul Haq, A., Ramanan, T. R., Shashikant, K. S., & Sridharan, R. (2010). A hybrid neural network–genetic algorithm approach for permutation flow shop scheduling. *International Journal of Production Research*, *48*(14), 4217–4231.

Oğuz, C., & Ercan, M. F. (2005). A genetic algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks. *Journal of Scheduling*, *8*(4), 323–351.

Oğuz, C., Ercan, M. F., Cheng, T. C. E., & Fung, Y.-F. (2003). Heuristic algorithms for multiprocessor task scheduling in a two-stage hybrid flow-shop. *European Journal of Operational Research*, *149*(2), 390–403.

Oğuz, C., & Fikret Ercan, M. (1997). Scheduling multiprocessor tasks in a two-stage flow-shop environment. *Proceedings of the 21st International Conference on Computers and Industrial Engineering*, *33*(1–2), 269–272. doi:10.1016/S0360-8352(97)00090-9

Oğuz, C., Zinder, Y., Janiak, A., & Lichtenstein, M. (2004). Hybrid flow-shop scheduling problems with multiprocessor task systems. *European Journal of Operational Research*, *152*(1), 115–131.

Omar, M. K., Teo, S. C., & Suppiah, Y. (2010). Mixed Integer Programming Formulation for Hybrid Flow Shop Scheduling Problem, 385–389.

Onwubolu, G. C., & Mutingi, M. (1999). Genetic algorithm for minimizing tardiness in flow-shop scheduling. *Production Planning & Control*, *10*(5), 462–471.

Ozgur, C. O., & Bai, L. (2010). Hierarchical composition heuristic for asymmetric sequence dependent single machine scheduling problems. *Operations Management Research*, *3*(1-2), 98–106. doi:10.1007/s12063-010-0031-5

Pan, Q., Duan, J., Liang, J. J., Gao, K., & Li, J. (2010). A Novel Discrete Harmony Search Algorithm for Scheduling Lot-streaming Flow Shops, 1531–1536.

Pan, Q.-K., & Ruiz, R. (2012). An estimation of distribution algorithm for lot-streaming flow shop problems with setup times. *Omega*, *40*(2), 166–180. doi:10.1016/j.omega.2011.05.002

Pearn, W. L., Chung, S. H., & Yang, M. H. (2002). The wafer probing scheduling problem (WPSP). *Journal of the Operational Research Society*, *53*(8), 864–874.

Pesch, E., & Sterna, M. (2009). Late work minimization in flow shops by a genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(4), 1202–1209.

Pfund, M., Fowler, J. W., Gadkari, A., & Chen, Y. (2008). Scheduling jobs on parallel machines with setup times and ready times. *Computers & Industrial Engineering*, *54*(4), 764–782.

Pinedo, M. L. (2009). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Springer Science & Business Media. Retrieved from https://books.google.com/books?id=ZUlDAAAAQBAJ&pgis=1

Qi, X., & Ã, X. Q. (2011). Outsourcing and production scheduling for a two-stage flow shop. *International Journal of Production Economics*, *129*(1), 43–50. doi:10.1016/j.ijpe.2010.08.011

Qian, B., Wang, L., Hu, R., Huang, D. X., & Wang, X. (2009). A DE-based approach to no-wait flow-shop scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(3), 787–805.

Qian, B., Wang, L., Huang, D., Wang, W., & Wang, X. (2009). An effective hybrid DE-based algorithm for multi-objective flow shop scheduling with limited buffers. *Part Special Issue: Operations Research Approaches for Disaster Recovery Planning*, *36*(1), 209–233. doi:10.1016/j.cor.2007.08.007

Qiao, P., & Sun, C. (2011). Research on hybrid flow-shop scheduling problem based on improved immune particle swarm optimization. In *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on* (pp. 4240–4243). IEEE.

Quadt, D., & Kuhn, H. (2007). A taxonomy of flexible flow line scheduling procedures. *European Journal of Operational Research*, *178*(3), 686–698. doi:10.1016/j.ejor.2006.01.042

Rabadi, G., Moraga, R. J., & Al-Salem, A. (2006). Heuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *17*(1), 85–97.

Rabiee, M., Sadeghi Rad, R., Mazinani, M., & Shafaei, R. (2014). An intelligent hybrid meta-heuristic for solving a case of no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *71*(5-8), 1229–1245. doi:10.1007/s00170-013-5375-1

Rajendran, C., & Ziegler, H. (2003). Scheduling to minimize the sum of weighted flowtime and weighted tardiness of jobs in a flowshop with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, *149*(3), 513–522. doi:10.1016/S0377-2217(02)00485-X

Rajkumar, R., & Shahabudeen, P. (2009). Bi-criteria improved genetic algorithm for scheduling in flowshops to minimise makespan and total flowtime of jobs. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *22*(10), 987–998.

Rangsaritratsamee, R., Ferrell, W. G., & Kurz, M. B. (2004). Dynamic rescheduling that simultaneously considers efficiency and stability. *Computers & Industrial Engineering*, *46*(1), 1–15.

Rebaine, D. (2010). Scheduling flexible flowshops with unit-time operations and minimum time delays. *ISCO 2010 - International Symposium on Combinatorial Optimization*, *36*(0), 1193–1200. doi:10.1016/j.endm.2010.05.151

Riane, F., Artiba, A., & Iassinovski, S. (2001). An integrated production planning and scheduling system for hybrid flowshop organizations. *Poductive Systems: Strategy, Control, and Management*, *74*(1–3), 33–48. doi:10.1016/S0925-5273(01)00105-0

Ribas, I., Leisten, R., & Framiñan, J. M. (2010). Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Operations Research and Data Mining in Biological Systems*, *37*(8), 1439–1454. doi:10.1016/j.cor.2009.11.001

Ribas, I., Leisten, R., Framiñan, J. M., & Framin, J. M. (2010). Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Operations Research and Data Mining in Biological Systems*, *37*(8), 1439–1454. doi:10.1016/j.cor.2009.11.001

Ribeiro, F. F., de Souza, S. R., & Souza, M. J. F. (2009). An adaptive genetic algorithm for solving the single machine scheduling problem with earliness and tardiness

penalties. In *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on* (pp. 698–703). IEEE.

Rocha, M., Paula, D., Robson, G., & Gómez, M. (2010). A non-delayed relax-and-cut algorithm for scheduling problems with parallel machines , due dates and sequence-dependent setup times. *Computers and Operation Research*, *37*(5), 938–949. doi:10.1016/j.cor.2009.07.006

Rocha, P. L., Ravetti, M. G., Mateus, G. R., & Pardalos, P. M. (2008). Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. *Computers & Operations Research*, *35*(4), 1250–1264.

Rodrigues, A. G., & Gómez, A. T. (2008). Scheduling problem treatment considering due dates, production turns and toll switching constraints using Tabu Search. *Production*, *18*(1), 64–75.

Romano, C. A., Salort, E. V., & Esteban, F.-C. L. (2002). MODELIZACIÓN DEL PROBLEMA DE SECUENCIACIÓN EN TALLERES DE FLUJO HÍBRIDOS CON TIEMPOS DE CAMBIO DE PARTIDA DEPENDIENTES DE LA SECUENCIA. *BEIO, Boletín de Estadística E Investigación Operativa*, *18*(2), 2–7.

Rotab Khan, M. R., Harlock, S. C., & Leaf, G. a. V. (1999). Computer simulation of production systems for woven fabric manufacture. *Computers & Industrial Engineering*, *37*(4), 745–756. doi:10.1016/S0360-8352(00)00009-7

Ruiz, R. (2009). Talleres de Flujo Híbrido con Tiempos de Cambio Dependientes de la Secuencia. Algoritmos basados en Búsqueda Local Iterativa*. In *XIII Congreso de Ingeniería de Organización* (pp. 1682–1690).

Ruiz, R., & Allahverdi, A. (2007). Some effective heuristics for no-wait flowshops with setup times to minimize total completion time. *Annals of Operations Research*, *156*(1), 143–171. doi:10.1007/s10479-007-0227-8

Ruiz, R., & Maroto, C. (2006). A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility. *European Journal of Operational Research*, *169*(3), 781–800. doi:10.1016/j.ejor.2004.06.038

Ruiz, R., Şerifoğlu, F. S., & Urlings, T. (2008). Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems. *Computers & Operations Research*, *35*(4), 1151–1175. doi:10.1016/j.cor.2006.07.014

Ruiz, R., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, *205*(1), 1–18. doi:10.1016/j.ejor.2009.09.024

Sadykov, R. (2012). A dominant class of schedules for malleable jobs in the problem to minimize the total weighted completion time. *Computers and Operation Research*, *39*(6), 1265–1270. doi:10.1016/j.cor.2011.02.023

Safari, E., & Sadjadi, S. J. (2011). A hybrid method for flowshops scheduling with condition-based maintenance constraint and machines breakdown. *Expert Systems With Applications*, *38*(3), 2020–2029. doi:10.1016/j.eswa.2010.07.138

Salinas Vivancos, C. (2004). *Estudio de la situación de las tecnologías de información en el sector textil catalán.* Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona.

Sangsawang, C., Sethanan, K., Fujimoto, T., & Gen, M. (2015). Metaheuristics optimization approaches for two-stage reentrant flexible flow shop with blocking constraint. *Expert Systems with Applications*, *42*(5), 2395–2410. doi:10.1016/j.eswa.2014.10.043

Sarıçiçek, İ., & Çelik, C. (2011). Two meta-heuristics for parallel machine scheduling with job splitting to minimize total tardiness. *Applied Mathematical Modelling*, *35*(8), 4117–4126.

Saydam, C., & Cooper, W. D. (2002). A decision support system for scheduling jobs on multi-port dyeing machines. *International Journal of Operations & Production Management*, *22*(9), 1054–1065.

Sbihi, M., & Varnier, C. (2008). Single-machine scheduling with periodic and flexible periodic maintenance to minimize maximum tardiness. *Computers & Industrial Engineering*, *55*(4), 830–840. doi:10.1016/j.cie.2008.03.005

Serafini, P. (1996). Scheduling jobs on several machines with the job splitting property. *Operations Research*, *44*(4), 617–628.

Shah, N. K., & Ierapetritou, M. G. (2011). Integrated production planning and scheduling optimization of multisite, multiproduct process industry. *Computers and Chemical Engineering*. doi:10.1016/j.compchemeng.2011.08.007

Shao, H., Chen, H.-P., Huang, G. Q., Xu, R., Cheng, B., Wang, S., & Liu, B. (2008). Minimizing makespan for parallel batch processing machines with non-identical job sizes using neural nets approach. In *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on* (pp. 1921–1924). IEEE.

Shiroma, P. J., & Niemeyer, G. (1998). Production scheduling in the textile industry: a practical approach using evolutionary algorithms with domain-dependent information. *IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.98CH36200)*, *1*, 269–273. doi:10.1109/IECON.1998.724134

Silva, C., & Magalhaes, J. M. (2006). Heuristic lot size scheduling on unrelated parallel machines with applications in the textile industry. *Computers & Industrial Engineering*, *50*(1), 76–89.

Sioud, A., Gagné, C., & Gravel, M. (2014a). A new ACO for solving a hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times. *Based Optimization (ICSIBO'2014)*, 162–169. Retrieved from http://www.mage.fst.uha.fr/icsibo2014/proceedings.pdf#page=172

Sioud, A., Gagné, C., & Gravel, M. (2014b). An ant colony optimization for solving a hybrid flexible flowshop. *… of the 2014 Conference Companion on …*, 17–18. doi:10.1145/2598394.2598402

Sioud, A., Gagné, C., & Gravel, M. (2014c). Minimizing Total Tardiness in a Hybrid Flexible Flowshop with Sequence Dependent Setup Times. In *INFOCOMP 2014: The fourth International Conference on Advanced Communications and Computation* (pp. 13–18). Retrieved from http://www.uqac.ca/portfolio/carolinegagne/files/2014/11/infocomp2014-14mai2014.pdf

Sioud, A., Gravel, M., & Gagné, C. (2013). A genetic algorithm for solving a hybrid flexible

flowshop with sequence dependent setup times. In *Evolutionary Computation (CEC) …* (pp. 2512–2516). IEEE. doi:10.1109/CEC.2013.6557871

Soewandi, H., & Elmaghraby, S. E. (2001). Sequencing three-stage flexible flowshops with identical machines to minimize makespan. *IIE Transactions*, *33*(11), 985–994.

Solano Charris, E. L. (2009). *Programación de talleres de producción seriales híbridos (flexibles) con múltiples objetivos mediante metaheurísticas*. Universidad del Norte.

Solari Dufour, M. D. L. Á., & Ocampo Edye, E. (2007). Aplicación de Algoritmos Genéticos en un Sistema Multiagente de Planificación en una Industria Manufacturera.

Solari, M. de los Á., & Ocampo, E. (2007). Application of Genetic Algorithms to a Manufacturing Industry Scheduling Multi-Agent System. In *Innovative Algorithms and Techniques in Automation, Industrial Electronics and Telecommunications* (pp. 263–268). Springer.

Song-yan, Z. (2010). Large-scale flow-shop scheduling based on genetic algorithm. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, *2*, 8.

Su, Z. S. Z., & Li, T. L. T. (2009). Genetic Algorithm for Minimizing the Makespan in Hybrid Flow Shop Scheduling Problem. *2009 International Conference on Management and Service Science*, *26*(3). doi:10.1109/ICMSS.2009.5301354

Tahar, D. N., Yalaoui, F., Chu, C., & Amodeo, L. (2006). A linear programming approach for identical parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times. *International Journal of Production Economics*, *99*(1), 63–73.

Taner, M. R., Hodgson, T. J., King, R. E., & Schultz, S. R. (2007). Satisfying due-dates in the presence of sequence dependent family setups with a special comedown structure. *Computers & Industrial Engineering*, *52*(1), 57–70. doi:10.1016/j.cie.2006.10.008

Tang, J., Zhang, G., & Lin, B. (2010). Hybrid Genetic Algorithm for Flow Shop Scheduling Problem, (5), 2–5. doi:10.1109/ICICTA.2010.767

Tang, L., Liu, W., & Liu, J. (2005). A neural network model and algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem in a dynamic environment. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *16*(3), 361–370.

Tang, L., & Wang, X. (2011). A scatter search algorithm for a multistage production scheduling problem with blocking and semi-continuous batching machine. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *19*(5), 976–989.

Tang, L., & Xuan, H. (2006). Lagrangian relaxation algorithms for real-time hybrid flowshop scheduling with finite intermediate buffers, 316–324. doi:10.1057/palgrave.jors.2602033

Tavakkoli-moghaddam, R., Taheri, F., Bazzazi, M., Izadi, M., & Sassani, F. (2009). Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints, *36*, 3224–3230. doi:10.1016/j.cor.2009.02.012

Taylor, P., Taj, S., Nedeltcheva, G. N., Pfeil, G., & Roumaya, M. (n.d.). A spread-sheet model for efficient production and scheduling of a manufacturing line / cell,

(November 2011), 37–41. doi:10.1080/00207543.2010.546379

Torabi, S. a., Sahebjamnia, N., Mansouri, S. A., & Bajestani, M. A. (2013). A particle swarm optimization for a fuzzy multi-objective unrelated parallel machines scheduling problem. *Applied Soft Computing*, *13*(12), 4750–4762. doi:10.1016/j.asoc.2013.07.029

Toro Ocampo, E. M., Granada Echeverri, M., & Restrepo Grisales, Y. S. (2006). Adaptación de la técnica de particle swarm al problema de secuenciamiento de tareas. *Scientia et Technica*, *3*(32), 307–312.

Toro Ocampo, E. M., Restrepo Grisales, Y. S., & Granada Echeverri, M. (2006). Algoritmo genetico modificado aplicado al problema de secuenciamiento de tareas en sistemas de produccion lineal–flow shop. *Scientia et Technica*, *1*(30).

Tsubone, H., Ohba, M., Takamuki, H., & Miyake, Y. (1993). A production scheduling system for a hybrid flow shop—a case study. *Omega*, *21*(2), 205–214. doi:10.1016/0305-0483(93)90053-N

Tsubone, H., Suzuki, M., Uetake, T., & Ohba, M. (2000). A Comparison between Basic Cyclic Scheduling and Variable Cyclic Scheduling in a Two-stage Hybrid Flow Shop. *Decision Sciences*, *31*(1), 197–222. doi:10.1111/j.1540-5915.2000.tb00930.x

Tupia, M., Mauricio, D., La Serna, N., Zegarra, R., Román, U., Guerra, J., … Vega, H. (2004). Un algoritmo voraz para resolver el problema de la programación de tareas dependientes en máquinas diferentes. *RISI. Revista de Investigación de Sistemas E Informática*, *1*(1).

Uetake, T., Tsubone, H., & Ohba, M. (1995). A production scheduling system in a hybrid flow shop. *International Journal of Production Economics*, *41*(1), 395–398.

Uhlig, T., & Rose, O. (2010). Solving Scheduling Problems with Sequence-Dependent Process Times by Evolutionary Algorithms. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1). Institute of Industrial Engineers-Publisher.

Ulusoy, G. (2004). Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-shops: a genetic algorithm approach. *Journal of the Operational Research Society*, *55*(5), 504–512. doi:10.1057/palgrave.jors.2601716

Urlings, T., Ruiz, R., & Şerifoğlu, F. S. (2010). Genetic algorithms with different representation schemes for complex hybrid flexible flow line problems. *International Journal of Metaheuristics*, *1*(1), 30–54. doi:10.1504/IJMHEUR.2010.033122

USITC. (2004). *Textiles and apparel: Assessment of the competitiveness of certain foreign suppliers to the US market*. *Washington, DC: US International Trade Commission, Publication* (Vol. 3671). doi:10.2307/1166677

Vallada, E., & Ruiz, R. (2011). A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, *211*(3), 612–622. doi:10.1016/j.ejor.2011.01.011

Van der Bruggen, M. (1998). *El sector textil en colombia*.

Van Vreckem, B., Borodin, D., De Bruyn, W., & Nowé, A. (2013). A Reinforcement Learning Approach to Solving Hybrid Flexible Flowline Scheduling Problems. In *MISTA 2013*. Retrieved from http://www.mendeley.com/research/reinforcement-learning-approach-solving-hybrid-flexible-flowline-scheduling-problems/

Vargas Nieto, F., & Montoya Torres, J. R. (2008). Implementing a Scheduling Procedure based on Evolutionary Algorithms for the Production of Hot-Stamped Labels. *Ingeniería Y Universidad*, *12*(2), 269–299.

Vazquez Rodriguez, J. A., & Salhi, A. (2005). Performance of single stage representation genetic algorithms in scheduling flexible flow shops. In *Evolutionary Computation, 2005. The 2005 IEEE Congress on* (Vol. 2, pp. 1364–1371). IEEE.

Vishwanathan, K., Kulkarni, N., Pachamuthu, A., Santos, D., & Damodaran, P. (2007). A Comparative Study of Dispatching Rules in Hybrid Flow Shops with Discrete and Batch Processors. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1278). Institute of Industrial Engineers-Publisher.

Voß, S., & Witt, A. (2007). Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application. *Scheduling in Batch-Processing Industries and Supply Chains*, *105*(2), 445–458. doi:10.1016/j.ijpe.2004.05.029

Wang, J. B., & Xia, Z. Q. (2005). Flow-shop scheduling with a learning effect. *Journal of the Operational Research Society*, *56*(11), 1325–1330.

Weintraub, A., Cormier, D., Hodgson, T., King, R., Wilson, J., & Zozom, A. (1999). Scheduling with alternatives: a link between process planning and scheduling. *IIE Transactions*, *31*(11), 1093–1102. doi:10.1080/07408179908969910

Weng, M. X., Lu, J., & Ren, H. (2001). Unrelated parallel machine scheduling with setup consideration and a total weighted completion time objective. *International Journal of Production Economics*, *70*(3), 215–226.

Weng, W., & Fujimura, S. (2012). Control methods for dynamic time-based manufacturing under customized product lead times. *European Journal of Operational Research*, *218*(1), 86–96. doi:10.1016/j.ejor.2011.10.014

Williams, R. H., Pitts, S. T., & Kamery, R. H. (2004). Scheduling decision rules for an integrated carpet manufacturer. *Academy of Legal, Ethical and Regulatory Issues*, 197.

Xiao, W., Hao, P., Zhang, S., & Xu, X. (2000). Hybrid flow shop scheduling using genetic algorithms. In *Intelligent Control and Automation, 2000. Proceedings of the 3rd World Congress on* (Vol. 1, pp. 537–541). IEEE.

Xie, X., & Tang, L. (2009). Analysis of a Heuristics for Scheduling Two-Stage Hybrid Flow Shop. In *Computational Sciences and Optimization, 2009. CSO 2009. International Joint Conference on* (Vol. 2, pp. 879–882). IEEE.

Xing, W., & Zhang, J. (2000). Parallel machine scheduling with splitting jobs. *Discrete Applied Mathematics*, *103*(1-3), 259–269. doi:10.1016/S0166-218X(00)00176-1

Xu, Y., Wang, L., Wang, S., & Liu, M. (2013). An effective shuffled frog-leaping algorithm for solving the hybrid flow-shop scheduling problem with identical parallel machines. *Engineering Optimization*, *45*(12), 1409. Retrieved from http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=91103490&lang=es&site=eds-live

Yagmahan, B., & Yenisey, M. M. (2008). Ant colony optimization for multi-objective flow shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, *54*(3), 411–420.

Yalaoui, N., Amodeo, L., Yalaoui, F., & Mahdi, H. (2010). Particle swarm optimization under fuzzy logic controller for solving a hybrid reentrant flow shop problem. In *Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum (IPDPSW), 2010 IEEE International Symposium on* (pp. 1–6). IEEE.

Yalaoui, N., Mahdi, H., Amodeo, L., & Yalaoui, F. (2011). A particle swarm optimization under fuzzy logic controller to solve a scheduling problem. In *Communications, Computing and Control Applications (CCCA), 2011 International Conference on* (pp. 1–6). IEEE.

Yanai, S., & Fujie, T. (2006). A three-machine permutation flow-shop problem with minimum makespan on the second machine. *Journal of the Operational Research Society*, *57*(4), 460–468. doi:10.1057/palgrave.jors.2602014

Yandra, & Tamura, H. (2007). A new multiobjective genetic algorithm with heterogeneous population for solving flowshop scheduling problems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *20*(5), 465–477.

Yang, J. (2011). Minimizing total completion time in two-stage hybrid flow shop with dedicated machines. *Computers & Operations Research*, *38*(7), 1045–1053. doi:10.1016/j.cor.2010.10.009

Yang, S., Ma, Y., Xu, D., & Yang, J. (2011). Minimizing total completion time on a single machine with a flexible maintenance activity. *Computers & Operations Research*, *38*(4), 755–770. doi:10.1016/j.cor.2010.09.003

Yao, F. S., Zhao, M., & Zhang, H. (2012). Two-stage hybrid flow shop scheduling with dynamic job arrivals. *Computers and Operation Research*, *39*(7), 1701–1712. doi:10.1016/j.cor.2011.10.006

Yaurima, V., Burtseva, L., & Tchernykh, A. (2009). Hybrid flowshop with unrelated machines , sequence-dependent setup time , availability constraints and limited buffers q. *Computers & Industrial Engineering*, *56*(4), 1452–1463. doi:10.1016/j.cie.2008.09.004

Yen-Wen, W., Chen-Hao, L., & Chin-Yuan, F. (2010). Develop a sub-population Memetic algorithm for multi-objective scheduling problems. In *Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on* (Vol. 5, pp. 579–583). IEEE.

Ying, K., & Cheng, H. (2010). Dynamic parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times using an iterated greedy heuristic. *Expert Systems With Applications*, *37*(4), 2848–2852. doi:10.1016/j.eswa.2009.09.006

Yokoyama, M. (2001). Hybrid flow-shop scheduling with assembly operations. *International Journal of Production Economics*, *73*(2), 103–116.

Yuan, K., Sauer, N., & Sauvey, C. (2009). Application of EM algorithm to hybrid flow shop scheduling problems with a special blocking. In *Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on* (pp. 1–7). IEEE.

Yue-wen, F., Feng-xing, Z., Xiao-hong, X., Qing-zhu, C., & Jia-hua, W. (2011). Hybrid Flow-Shop Scheduling Method Based on Multi- agent Particle Swarm Optimization *, (June), 755–759.

Zandieh, M., Dorri, B., & Khamseh, A. (2009). Robust metaheuristics for group scheduling

with sequence-dependent setup times in hybrid flexible flow shops. *The International Journal of Advanced …*. Retrieved from http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-008-1740-x

Zandieh, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Moattar Husseini, S. M. (2006). An immune algorithm approach to hybrid flow shops scheduling with sequence-dependent setup times. *Applied Mathematics and Computation*, *180*(1), 111–127. doi:10.1016/j.amc.2005.11.136

Zandieh, M., & Hashemi, A. (2015). Group scheduling in hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times and random breakdowns via integrating genetic algorithm and simulation. *International Journal of Industrial …*. Retrieved from http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJISE.2015.072273

Zandieh, M., & Karimi, N. (2010). An adaptive multi-population genetic algorithm to solve the multi-objective group scheduling problem in hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-009-0374-7

Zandieh, M., & Karimi, N. (2011). An adaptive multi-population genetic algorithm to solve the multi-objective group scheduling problem in hybrid flexible flowshop with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *22*(6), 979–989.

Zandieh, M., Mozaffari, E., & Gholami, M. (2009). A robust genetic algorithm for scheduling realistic hybrid flexible flow line problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *21*(6), 731–743. doi:10.1007/s10845-009-0250-5

Zandieh, M., Mozaffari, E., & Gholami, M. (2010). A robust genetic algorithm for scheduling realistic hybrid flexible flow line problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Retrieved from http://link.springer.com/article/10.1007/s10845-009-0250-5

Zarandi, M. H. F., & Esmaeilian, M. (2003). A systematic fuzzy modeling for scheduling of textile manufacturing system. In *Fuzzy Information Processing Society, 2003. NAFIPS 2003. 22nd International Conference of the North American* (pp. 359–364). IEEE.

Zarandi, M. H. F., Esmaeilian, M., & Zarandi, M. M. F. (2007). A systematic fuzzy system modeling for scheduling of textile manufacturing system. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, *2*(4), 297–309.

Zhan, Y., & Qiu, C. (2008). Genetic algorithm application to the hybrid flow shop scheduling problem. In *Mechatronics and Automation, 2008. ICMA 2008. IEEE International Conference on* (pp. 649–653). IEEE.

Zhang, C., Ning, J., & Ouyang, D. (2010). A hybrid alternate two phases particle swarm optimization algorithm for flow shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, *58*(1), 1–11.

Zhang, W., Yin, C., Liu, J., & Linn, R. J. (2005). Multi-job lot streaming to minimize the mean completion time in m-1 hybrid flowshops. *International Journal of Production Economics*, *96*(2), 189–200. doi:10.1016/j.ijpe.2004.04.005

Zhang, X., & van de Velde, S. (2012). Approximation algorithms for the parallel flow shop

problem. *European Journal of Operational Research*, *216*(3), 544–552. doi:10.1016/j.ejor.2011.08.007

Zhao, X., & Tang, J. (2010). No-wait flow shop scheduling based on artificial immune system. In *Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference on* (Vol. 3, pp. 436–440). IEEE.

Zheng, T., & Yamashiro, M. (2010). Solving flow shop scheduling problems by quantum differential evolutionary algorithm, 643–662. doi:10.1007/s00170-009-2438-4

Zhou, X., & Lu, Y.-Z. (2010). A New Heuristic Method Combined with Lagrangian Relaxation Algorithm for Hybrid Flow Shop Problem. In *2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 2426–2430).