

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Adaptación de heurísticas de Bin Packing a la
optimización de la carga de un autoclave

Autor: Ana Sánchez Ruiz de León

Tutor: Pedro Luis González Rodríguez

Dep. Organización Industrial y Gestión de empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Adaptación de heurísticas de Bin Packing a la optimización de la carga de un autoclave

Autor:

Ana Sánchez Ruiz de León

Tutor:

Pedro Luis González Rodríguez

Profesor titular

Dep. Organización Industrial y Gestión de empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Adaptación de heurísticas de Bin Packing a la optimización de la carga de un autoclave

Autor: Ana Sánchez Ruiz de León

Tutor: Pedro Luis González Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mis padres, Ana y Pablo, por haberme apoyado a lo largo de esta etapa y por haberme inculcado, junto a mis abuelos y yayos la cultura del esfuerzo y del trabajo, indispensable para haber llegado al día de hoy. A mis hermanos, Pablo y Elena, por apoyarme y animarme a lo largo de toda la carrera.

A Esperanza y Antonio por ser la base de todo esto. Gracias igualmente a Laura porque sin ella me hubiera costado mucho más llegar hasta aquí.

También quiero dar las gracias a todos mis amigos y compañeros de la escuela, por el tiempo y el esfuerzo compartidos en cada clase, práctica y hora de estudio.

Agradecer especialmente a Sergio no sólo por su apoyo, su paciencia y ayuda, sino también por darme siempre fuerza en los momentos más complicados y no dejarme nunca tirar la toalla.

Por último agradecer a Pedro Luis fundamentalmente por representar el espíritu universitario. También por supuesto por su paciencia y ayuda para realizar este trabajo,

Ana Sánchez Ruiz de León

Sevilla, 2016

Resumen

El proceso de curado en autoclave de piezas de material compuesto representa generalmente un cuello de botella en la fabricación de composites. Se busca la manera de producir el mayor número de piezas de composite en un mismo tiempo y obtener así un mayor beneficio.

Existen modelos de programación lineal que permiten optimizar este proceso. El problema reside en los casos de más complejos que necesitan mayor tiempo para alcanzar una solución, lo que merma la eficiencia de este método.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fin de grado es encontrar la forma de afrontar el problema de distribución de piezas de material compuesto para su curado en autoclave, de forma que se alcancen resultados cercanos al óptimo en el menor tiempo posible.

Abstract

The curing process of composite materials in autoclave usually represents the bottleneck of their manufacture. The purpose is to find the way to produce the largest number of composites at the same time and therefore achieve greater profit.

We already know about the existence of some Mixed Integer Linear Program models which aim is to optimize this process. Their disadvantage lies in the more complex cases in which a larger amount of time is needed in order to reach a result, which in some way, decrease the method' efficiency.

Consequently, the purpose of this dissertation is to find a technique to deal with the problem of composite parts placement for their cure in autoclave, in order to accomplish results close to the optimal solutions, in the minor possible time.

Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	11
Índice	13
Índice de Tablas	16
Índice de Figuras	17
1 Objetivo y Justificación del Trabajo	19
1.1 <i>Justificación del trabajo</i>	19
1.2 <i>Objeto del trabajo</i>	19
1.3 <i>Sumario</i>	20
2 Descripción del Problema	21
2.1 <i>Materiales compuestos</i>	21
2.1.1 <i>Fabricación de materiales compuestos</i>	23
2.2 <i>Moldeo en autoclave</i>	25
2.2.1 <i>Carcasa principal y sistema de cierre</i>	26
2.2.2 <i>Sistema de circulación de aire</i>	26
2.2.3 <i>Sistema de calentamiento</i>	26
2.2.4 <i>Sistema de enfriamiento</i>	26
2.2.5 <i>Sistema de presurización</i>	27
2.2.6 <i>Sistema de vacío</i>	27
2.2.7 <i>Sistema de carga</i>	27
2.2.8 <i>Sistema eléctrico</i>	27
2.2.9 <i>Sistema de control</i>	27
2.3 <i>Proceso físico</i>	27
2.4 <i>Proceso de curado</i>	28
2.4.1 <i>Preparación de las piezas</i>	29
2.4.2 <i>Etapas</i>	30
2.4.3 <i>Variables</i>	30
3 Entorno de Trabajo	33
3.1 <i>El autoclave</i>	33
3.2 <i>Particularidades</i>	34
3.2.1 <i>Materiales a procesar</i>	34
3.2.2 <i>Ciclo de curado</i>	34
3.2.3 <i>Utillaje</i>	35
3.3 <i>Piezas</i>	36
3.3.1 <i>Piezas α'</i>	37
3.4 <i>Penalizaciones</i>	37
3.5 <i>Escenarios</i>	39
4 Revisión de la Literatura Existente	43
4.1 <i>Modelado matemático</i>	43
4.1.1 <i>Escenario 1</i>	46
4.1.2 <i>Escenario 2</i>	47
4.1.3 <i>Escenario 3</i>	48
4.1.4 <i>Escenario 4</i>	49
4.1.5 <i>Escenario 5</i>	50
4.1.6 <i>Escenario 6</i>	51

4.2	Heurísticas Bin Packing	52
5	Diseño de Heurísticas	56
5.1	Primera fase	56
5.2	Segunda fase	58
5.2.1	HNF	59
5.2.2	AUTO	60
6	Experimentación	62
6.1	Diseño experimental	62
6.1.1	Pooling	62
6.1.2	Escenario 1	64
6.1.3	Escenario 2	65
6.1.4	Escenario 3	67
6.1.5	Escenario 4	68
6.1.6	Escenario 5	70
6.1.7	Escenario 6	71
6.2	Estudio de las heurísticas para todos los escenarios	73
6.2.1	AUTO	73
6.2.2	HNF	74
6.3	Estudio de los resultados por escenario	76
6.3.1	Escenario 1	76
6.3.2	Escenario 2	78
6.3.3	Escenario 3	80
6.3.4	Escenario 4	82
6.3.5	Escenario 5	84
6.3.6	Escenario 6	86
7	Análisis De Los Resultados	88
7.1	Representación de los escenarios con la heurística AUTO_B + LcTc	90
7.1.1	Escenario 1	91
7.1.2	Escenario 2	92
7.1.3	Escenario 3	93
7.1.4	Escenario 4	94
7.1.5	Escenario 5	95
7.1.6	Escenario 6	96
8	Conclusiones	97
	Bibliografía	98

Índice de Tablas

Tabla 3-1: Propiedades de los impregnados utilizados	34
Tabla 3-2: Clasificación de piezas	36
Tabla 3-3: Penalizaciones por tipo de piezas (ρ_i')	38
Tabla 3-4: Penalización ρ_{ijvh} con respecto a la posición de la pieza	38
Tabla 3-5: Penalización ρ_{ijvh} en presencia de piezas α'	39
Tabla 3-6: Detalles de las piezas para los escenarios 1-3.	40
Tabla 3-7: Detalles de las piezas para los escenarios 4-6.	42
Tabla 4-1: Resultados escenario 1	46
Tabla 4-2: Resultados escenario 2	47
Tabla 4-3: Resultados escenario 3	48
Tabla 4-4: Resultados escenario 4	49
Tabla 4-5: Resultados escenario 5	50
Tabla 4-6: Resultados escenario 6	51
Tabla 4-7: Comparativa de resultados para los escenarios reales	52
Tabla 5-1: Comparativa de heurísticas	56
Tabla 6-1: Mejores resultados por heurísticas	73
Tabla 6-2: Heurística AUTO, Orden A	74
Tabla 6-3: Heurística AUTO, Orden B	74
Tabla 6-4: Heurística HNF, Orden A	75
Tabla 6-5: Heurística HNF, Orden B	75
Tabla 6-6: Escenario 1, Orden A	76
Tabla 6-7: Escenario 1, Orden B	77
Tabla 6-8: Escenario 2, Orden A	78
Tabla 6-9: Escenario 2, Orden B	79
Tabla 6-10: Escenario 3, Orden A	80
Tabla 6-11: Escenario 3, Orden B	81
Tabla 6-12: Escenario 4, Orden A	82
Tabla 6-13: Escenario 4, Orden B	83
Tabla 6-14: Escenario 5, Orden A	84
Tabla 6-15: Escenario 5, Orden B	85
Tabla 6-16: Escenario 6, Orden A	86
Tabla 6-17: Escenario 6, Orden B	87
Tabla 7-1: Resultados del diseño experimental por escenarios	88
Tabla 7-2: Eficiencia de las heurísticas AUTO	88
Tabla 7-3: Eficiencia de las heurísticas HNF	89

Índice de Figuras

Figura 2-1: Clasificación Composites	22
Figura 2-2: Tipos de refuerzo	22
2-3: Proceso de bobinado de filamentos	24
Figura 2-4: Etapas de fabricación de materiales compuestos	25
Figura 2-5: Autoclaves de gran dimensión	25
Figura 2-6: Visualización de flujo del gas en el autoclave	26
Figura 2-7: Ciclo de temperatura estándar T y presión P	27
Figura 2-8: Ejemplo de tiempos de curado para un lote de pieza	28
Figura 2-9: Esquema de las capas de la preparación de las piezas	29
Figura 2-10: Temperatura y presión durante el curado en autoclave	30
Figura 2-11: Variables del proceso de curado	31
Figura 3-1: Dimensiones autoclave	33
Figura 3-2: Distribución autoclave	33
Figura 3-3: Distribución de los niveles	34
Figura 3-4: Perfiles de curado representativos medidos durante un ciclo de curado en autoclave.	35
Figura 3-5: Utillaje tipo A	35
Figura 3-6: Utillaje tipo B	35
Figura 3-7: Utillaje tipo C	36
Figura 3-8: Posibles casos según la altura máxima de piezas α'	37
Figura 3-9: Ejemplo de colocación de una pieza	39
Figura 4-1: Modelo MILP	45
Figura 4-2: Sistema de referencia en las bandejas	45
Figura 4-3: Distribución escenario 1	46
Figura 4-4: Distribución escenario 2	47
Figura 4-5: Distribución escenario 3	48
Figura 4-6: Distribución escenario 4	49
Figura 4-7: Distribución escenario 5	50
Figura 4-8: Distribución escenario 6	51
Figura 4-9: Ejemplo de distribución de piezas en la primera fase de Hybrid First Fit	53
Figura 4-10: Ejemplo completo de Hybrid First Fit	53
Figura 4-11: Ejemplo de distribución de piezas en la primera fase de Hybrid Next Fit	54
Figura 4-12: Ejemplo completo de Hybrid Next Fit	54
Figura 5-1: Reordenación de piezas	57
Figura 5-2: Colocación de piezas en las bandejas	58
Figura 5-3: Áreas de menor penalización por niveles	59
Figura 5-4: Distribución de bandejas para la heurística HNF	60
Figura 5-5: Distribución de bandejas para la heurística AUTO	61

Figura 6-1: ANOVA Escenario 1	64
Figura 6-2: MEDIAS MARGINALES Escenario 1	65
Figura 6-3: ANOVA Escenario 2	66
Figura 6-4: MEDIAS MARGINALES Escenario 2	67
Figura 6-5: ANOVA Escenario 3	67
Figura 6-6: MEDIAS MARGINALES Escenario 3	68
Figura 6-7: ANOVA Escenario 4	69
Figura 6-8: MEDIAS MARGINALES Escenario 4	70
Figura 6-9: ANOVA Escenario 5	70
Figura 6-10: MEDIAS MARGINALES Escenario 5	71
Figura 6-11: ANOVA Escenario 6	72
Figura 6-12: MEDIAS MARGINALES Escenario 6	72
Figura 7-1: AUTO_B + LcTc Escenario 1	91
Figura 7-2: AUTO_B + LcTc Escenario 2	92
Figura 7-3: AUTO_B + LcTc Escenario 3	93
Figura 7-4: AUTO_B + LcTc Escenario 4	94
Figura 7-5: AUTO_B + LcTc Escenario 5	95
Figura 7-6: AUTO_B + LcTc Escenario 6	96

1 OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

En este capítulo se justificará la temática elegida y su interés en la actualidad. También se expondrá el porqué del proyecto, explicando su objetivo principal y la forma en que se ha abordado. Por último, se presenta un breve resumen mostrando cómo se estructurará el trabajo desarrollado.

1.1 Justificación del trabajo

Las empresas dedicadas a la fabricación de piezas de materiales compuestos mediante autoclave cuentan con un número limitado de estos aparatos debido a su alto coste y dimensiones (ya que pueden llegar a abarcar un volumen de hasta 2321 m³). Esto hace que el proceso de curado en autoclave se convierta generalmente en un cuello de botella en la fabricación de piezas. Por ello, la optimización de este proceso resulta imprescindible para permitir la producción de un mayor número de piezas de composite en un mismo tiempo y obtener así un mayor beneficio.

Éste es además un proceso tecnológico bastante costoso en dinero y energía. Es por eso que, para un uso más eficiente de los recursos, el objetivo es minimizar al máximo los tiempos de procesamiento sin variar las condiciones de curado de las piezas procesadas.

A lo largo de la carrera, y especialmente durante la intensificación, hemos cursado numerosas asignaturas relacionadas con la optimización de procesos y recursos. Abordar este problema ha supuesto para mí no sólo una motivación personal sino también una oportunidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos y de explotar todas las capacidades desarrolladas a lo largo de estos años.

1.2 Objeto del trabajo

El objetivo de este trabajo de fin de grado es encontrar una metodología de resolución para la distribución completa de un lote de piezas en un autoclave. Debe ser una heurística eficiente de fácil y rápida ejecución.

Este trabajo continúa el estudio de distribución de piezas en un autoclave realizado por Dios (2015) y Dios *et al.* (2016), con métodos heurísticos. Nuestro objetivo es encontrar una regla de distribución de piezas, heurística, que nos permita alcanzar unos tiempos de ciclo en el autoclave asumibles respecto a los tiempos óptimos ya conocidos. La localización de cada pieza vendrá dada, como se explicará más adelante, por las coordenadas (x, y), su orientación (horizontal o vertical), el coche, el nivel y la bandeja en los que se encuentra.

Dicho objeto se ha abarcado dividiéndolo en los siguientes objetivos específicos:

1. Descripción del problema: estudio del problema físico.
2. Estudio del entorno de trabajo: análisis de las características del autoclave y de un conjunto de lotes de piezas concreto.
3. Revisión de la literatura existente en busca de procesos y problemas similares.
4. Propuesta de heurísticas: diseño y modelado.
5. Experimentación: ejecución de simulaciones para comprobar la validez de las heurísticas diseñadas.

Por lo tanto, para la consecución del objetivo se ha diseñado un software a través del cual se permite determinar de una manera rápida y sencilla distribuciones a lo largo del autoclave. Para ello han sido necesarios algunos desarrollos informáticos que serán descritos en capítulos posteriores. Una vez desarrollado el software, se han ejecutado las diferentes heurísticas por cada escenario para comprobar que los tiempos de ciclo obtenidos son asumibles y aceptables.

1.3 Sumario

El proyecto se estructura en nueve capítulos. El primer capítulo, el actual, presenta una justificación de por qué se ha llevado a cabo, así como el objeto del proyecto y un sumario con el contenido del resto de capítulos.

El capítulo 2 describe el proceso de fabricación de materiales compuestos, entrando en más detalle en el proceso mediante autoclave.

El capítulo 3 profundiza en el entorno del problema, describiendo las características propias del autoclave y los escenarios de estudio.

El capítulo 4 presenta una revisión sobre estudios anteriores relacionados con este trabajo fin de grado.

El capítulo 5 contiene el diseño de las heurísticas elaboradas para la resolución del problema objeto de estudio.

El capítulo 6 recoge los resultados obtenidos tras la experimentación y las simulaciones llevadas a cabo para comprobar la utilidad del presente trabajo.

El capítulo 7 presenta un análisis de los resultados anteriores.

El capítulo 8 expone las conclusiones del proyecto.

El capítulo 9 presenta la bibliografía empleada en este trabajo.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se abarcará el primer objetivo específico del trabajo planteado en el capítulo 1.1., la descripción del problema físico. Se procede entonces a estudiar el proceso tecnológico de fabricación de piezas de materiales compuestos (Dios, 2015).

2.1 Materiales compuestos

Un material compuesto o "composite" es un sistema material integrado por una combinación de dos o más micro o macro estructuras que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí. Los composites conservan, al menos parcialmente, las propiedades de sus sistemas constituyentes y se diseñan para que presenten la combinación de propiedades más favorable (Advani *et al.* 2010).

Algunas de sus propiedades más significativas son:

- Su resistencia mecánica, a corrosión y abrasión.
- Su rigidez.
- Su bajo peso.
- Su capacidad de aislamiento tanto acústico como térmico.
- Su resistencia a esfuerzos de fatiga.

Estos materiales están generalmente compuestos por dos elementos: la matriz y el refuerzo (fibras o partículas dispersas). La matriz transmite la carga a los refuerzos y proporciona protección y cohesión, permitiendo que éstos mantengan la posición correcta. Los refuerzos se encargan de soportar la mayor parte de las cargas, incrementando así la resistencia y rigidez mecánica del material. Mejoran también el comportamiento a altas temperaturas y a la abrasión.

Según el constituyente de la matriz, los materiales compuestos responden a la siguiente clasificación (figura 2.1):

- OMCs: Compuestos de matriz orgánica. Este grupo acepta a su vez una clasificación propia:
 - Composites de matriz de carbono.
 - Composites de matriz polimérica: Compuestos orgánicos de cadenas muy largas formados por la unión de moléculas cortas (monómeros). Pueden ser:
 - Termoestables: Presentan baja viscosidad y necesitan ser curados.
 - Termoplásticos: Caracterizados por su alta viscosidad y su capacidad de ser reciclados.
- MMCs: Formados por materiales como el aluminio, el titanio y el magnesio.
- PMCs: Presentan sólidos inorgánicos no metálicos.

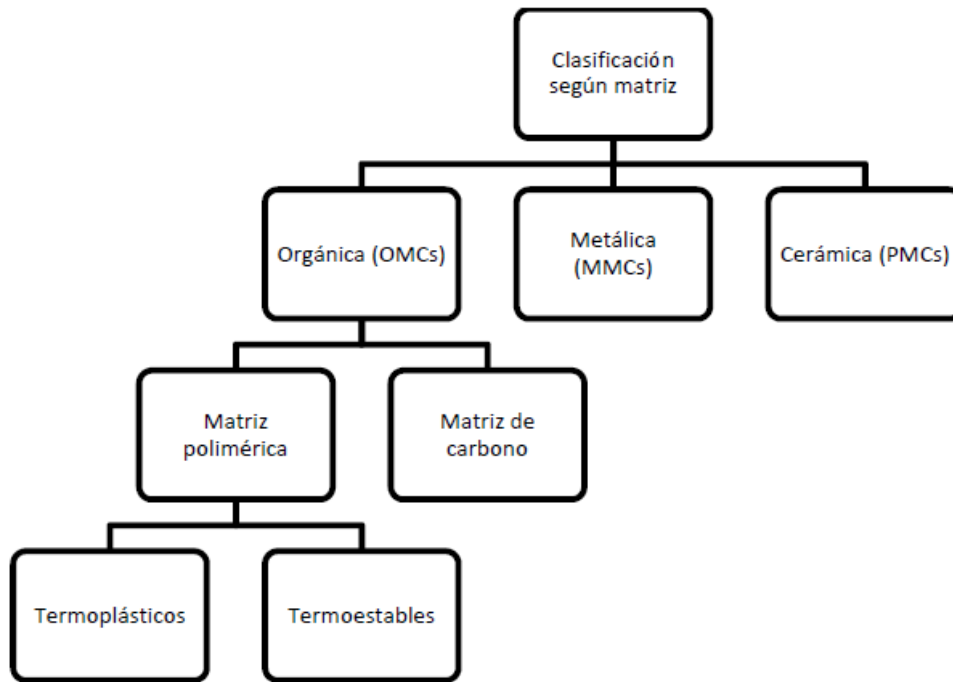


Figura 2-1: Clasificación Composites

Atendiendo a las fibras que emplean de refuerzo del composite encontramos, entre otros, los siguientes grupos:

- Refuerzo con fibras cortas: Monocristales casi libres de defectos.
- Refuerzo con partículas: Refuerzos cuyas dimensiones son iguales en todas las direcciones.
- Laminados de fibra continua: Refuerzos de dimensión mucho mayor a los anteriores. Se tratan de los más comunes
- Tejidos: Fibras trenzadas y entrelazadas, de forma general perpendicularmente.

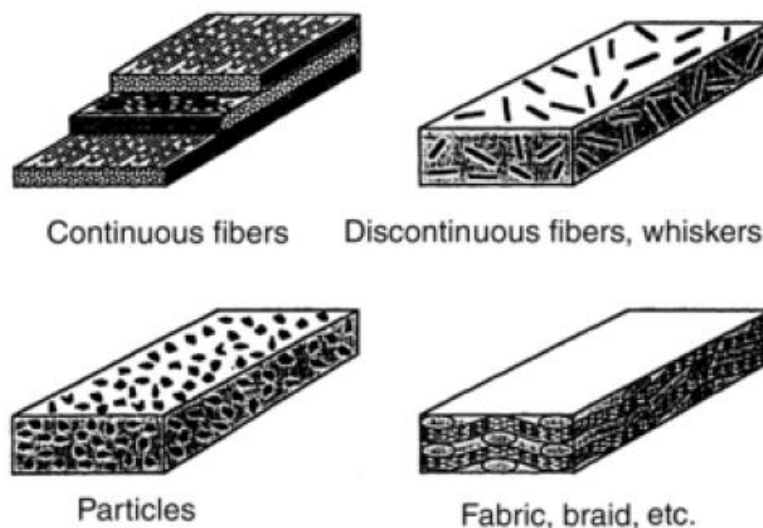


Figura 2-2: Tipos de refuerzo

Este trabajo se centra en los materiales compuestos de matriz polimérica (OMCs) y refuerzo de fibras continuas, en los que para su fabricación es necesario un proceso de curado.

Los materiales con matriz termoestables, con los que trabajaremos, presentan una baja viscosidad y sufren reacciones químicas durante su fabricación. Su rango de temperatura oscila entre los 121°C y los 204°C, su

tiempo de ciclo se encuentra entre las 3 y 7 horas y requieren una presión de entre 50 y 100 psi. Se fabrican en lotes y su tasa de desechos resulta alta.

2.1.1 Fabricación de materiales compuestos

Lo primero es elegir el material a utilizar. Para esto se tienen cuenta características como:

- El coste de la materia prima y su disponibilidad.
- Las especificaciones del material y si son aptas.
- La facilidad de procesamiento, fabricación y manipulación.
- Capacidad de ser utilizado en procesos automatizados.

A su vez, también es importante una elección adecuada del utillaje a utilizar, de forma que facilite el correcto desarrollo del composite. Se comprueban factores como:

- La configuración de la pieza y el proceso de curado.
- Coste, repetitividad, durabilidad y posibilidad para desarrollos futuros.
- Laminado de la pieza, sistema de vacío, requisitos de tolerancia, efecto de la expansión térmica, adhesión de superficies en contacto, tamaño de la pieza a curar...

La expansión térmica tiene gran importancia en los materiales compuestos porque suelen presentar un coeficiente de expansión térmica direccional (CTE) aproximadamente nulo en la dirección de las fibras lo que puede generar tensiones en la unión con los metales. Para reducir su efecto se deben seguir los siguientes procedimientos:

- Usar el laminado simétrico para minimizar el alabeo y las deflexiones de las láminas.
- Incrementar el valor del CTE en la dirección 0° aumentando las capas de 90° en el laminado.
- Adaptar los laminados según el CTE requerido.

Existen numerosos procesos de fabricación para la manufactura de estos materiales y se identifican por las instalaciones que se requieren o por el utillaje que emplean. Cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes, por eso es importante conocerlas a fondo para así escoger el proceso que más se adapte al tipo de pieza que se quiera fabricar.

La elección del proceso de fabricación se hace en función de los siguientes parámetros:

- El tipo de material compuesto y la forma en la que se encuentra. Normalmente se utilizan preimpregnados, que son estructuras de fibras impregnadas con resinas reactivas.
- El utillaje.
- La severidad de las tolerancias.
- La posibilidad de fabricar la pieza como una única parte.
- La posibilidad de automatizar el proceso.

Algunos de los métodos de fabricación de materiales compuestos con fibra más empleados son:

2.1.1.1 Procesos en molde abierto

Se caracterizan por la existencia de una sola superficie de molde positivo o negativo para producir estructuras laminadas. Los materiales iniciales se aplican al molde en capas que se acumulan con el espesor deseado. Esto

es seguido posteriormente por el curado del material y la retirada de utillaje.

Su principal ventaja es el menor coste que supone utilizar un solo que si usáramos una pareja de moldes. A si mismo, la desventaja es que únicamente se obtiene una superficie acabada, quedando el otro lado más áspero.

Algunos de los procesos de molde abierto más utilizados son:

- Aplicado manual
- Aplicado por atomización (dispersión)
- Máquinas de aplicación automatizada
- Moldeo con bolsa de vacío
- Moldeo con bolsa a presión
- Moldeo en autoclave

2.1.1.2 Procesos en moldecerrado

En estos procesos los moldes consisten en dos secciones que se abren y cierran durante cada ciclo de moldeo.

Estos procesos precisan de un equipo más complejo lo que supone un mayor gasto en herramientas que se suma al doble coste por el uso de parejas de moldes. Sin embargo, proporcionan un buen acabado en ambas superficies, presentan velocidades de producción más altas, mayor control sobre las tolerancias y permiten formas tridimensionales más complejas.

Algunos de los procesos de molde cerrado son:

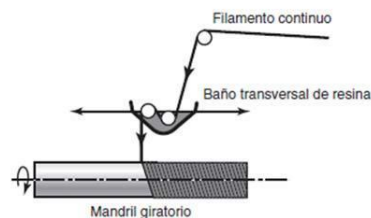
- Moldeo por comprensión
- Moldeo por transferencia de resina (RTM)
- Moldeo por inyección

2.1.1.3 Bobinado de filamentos

En este método se enrollan fibras continuas impregnadas con resina alrededor de un mandril giratorio, que tiene la forma de la pieza que se quiere fabricar. Debido a esto, se suele emplear para piezas cilíndricas y de revolución.

Hay varios métodos para impregnar las fibras con resina:

- Bobinado húmedo
- Bobinado seco
- Postimpregnación



2-3: Proceso de bobinado de filamentos

2.1.1.4 Pultrusión y pulformado

Son procesos similares a la extrusión pero que implican el estirado de la pieza de trabajo. Con pultrusión se pueden conseguir piezas continuas rectas de sección transversal constante y piezas curvas con pulformado.

2.2 Moldeo en autoclave

El moldeo en autoclave es un proceso de moldeo abierto como se ha comentado anteriormente y el proceso que se utiliza en este trabajo. La figura 2.4 muestra las distintas etapas en las que se divide un proceso de fabricación de piezas de material compuesto en autoclave.

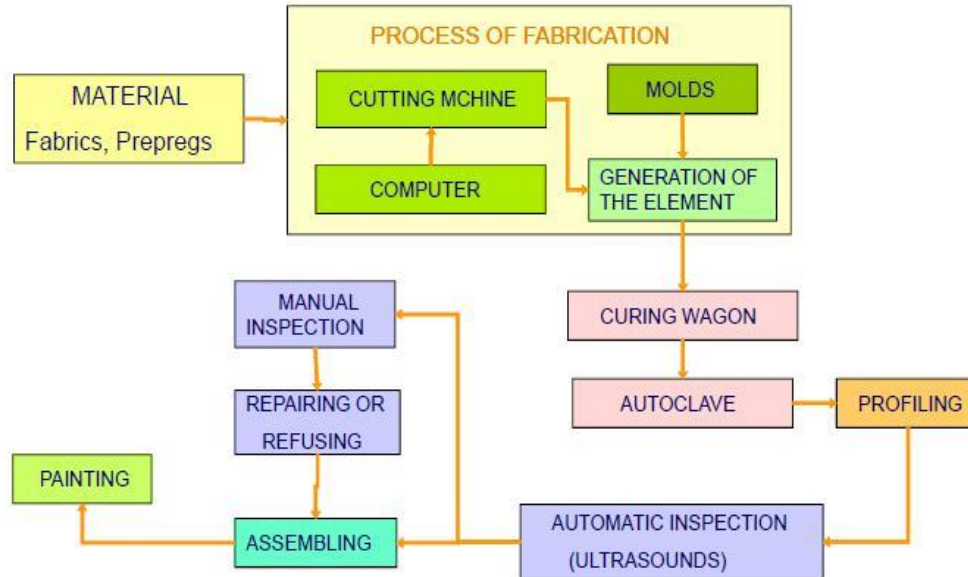


Figura 2-4: Etapas de fabricación de materiales compuestos

Un autoclave se define como un depósito presurizado capaz de mantener un determinado aire o gas a una temperatura y presión constantes, utilizado para el curado de piezas de material compuesto. Existen autoclaves de tamaños muy diversos en función de las piezas que vayan a ser procesadas. La siguiente figura (Figura 2.5) muestra un autoclave de enormes dimensiones utilizado en la industria aeronáutica.

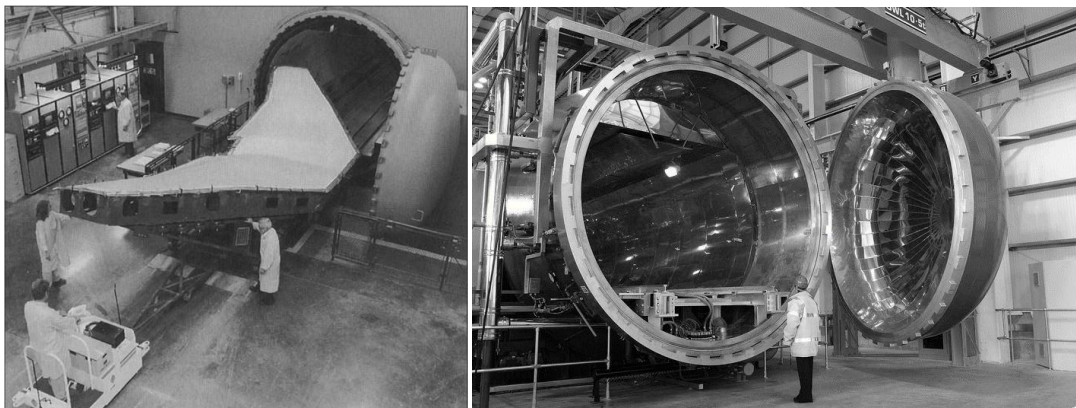


Figura 2-5: Autoclaves de gran dimensión

Los autoclaves cuentan con sistemas que permiten el control de diferentes variables que intervienen en el proceso de curado de composites: temperatura, presión, tiempo, vacío, flujo de gas... Estos sistemas de los que se compone un autoclave son:

- Carcasa principal y sistema de cierre
- Sistema de circulación de aire
- Sistema de calentamiento
- Sistema de enfriamiento
- Sistema de presurización
- Sistema de vacío
- Sistema de carga

- Sistema eléctrico
- Sistema de control

2.2.1 Carcasa principal y sistema de cierre

La carcasa principal consiste en un contenedor sellado en el que se colocan las piezas para ser procesadas bajo condiciones de temperatura, presión y vacío. El sistema de cierre y aislamiento de ésta es de gran importancia pues en el interior del autoclave se llegan a alcanzar condiciones extremas muy diferentes a las del exterior.

Durante el curado de las piezas la superficie exterior de la carcasa del autoclave no debe superar los 25°C. Por esto, el autoclave debe disponer de un sistema de aislamiento adecuado en su interior como pueden ser lanas minerales. Igualmente importante es el correcto sellado de la cámara donde se introducen las piezas. Existen dos sistemas para ello: el sello hinchable y el sellado mediante pestañas.

2.2.2 Sistema de circulación de aire

Se trata de un sistema de circulación forzada de gases (aire o nitrógeno) y se compone de un extractor centrífugo y un sistema de tuberías para transportar el gas. Este sistema se encarga de acelerar el proceso de refrigeración y enfriamiento de las piezas en el autoclave.

El extractor recibe el gas en dirección axial y lo devuelve en dirección radial, pasando posteriormente por los calentadores colocados a su alrededor. La velocidad del gas en el interior debe ser de 1 o 2 m/s.

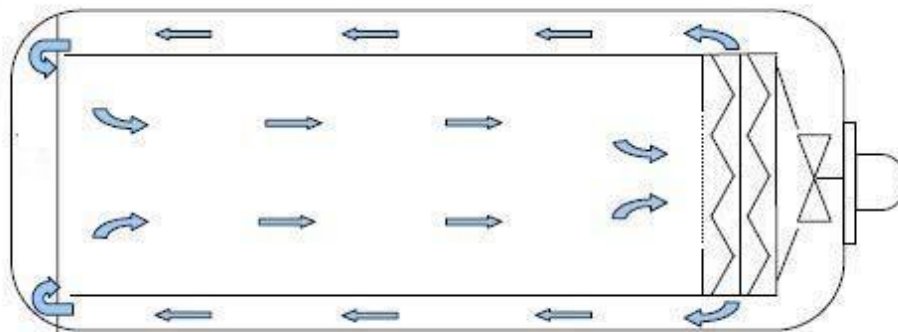


Figura 2-6: Visualización de flujo del gas en el autoclave

2.2.3 Sistema de calentamiento

Este sistema se encarga de calentar el autoclave mediante un sistema de resistencias eléctricas o mediante combustiones indirectas de gases (circulando fluido caliente o frío por las tuberías). Es el primer método el que otorga un control más preciso de la temperatura mediante el control informático de los calentadores.

2.2.4 Sistema de enfriamiento

Al contrario que el sistema anterior este sistema se encarga de reducir la temperatura en el autoclave. En los autoclaves con sistemas de calentamiento eléctricos este enfriamiento se consigue desconectando los calentadores o variando la alimentación eléctrica de estos.

Para la refrigeración del autoclave hay que tener en cuenta factores como la temperatura en el ambiente del autoclave y en el medio de refrigeración, el rango de flujo del medio de refrigeración, el área de transferencia de calor disponible, el coeficiente de transferencia de calor de las tuberías... Normalmente, la refrigeración se controla variando el flujo del líquido refrigerante, generalmente agua.

2.2.5 Sistema de presurización

Se encarga de proporcionar los valores de presión requeridos en el interior del autoclave. Generalmente se emplea nitrógeno para la presurización. Los sistemas de presurización de nitrógeno están compuestos por dos compresores, una planta de nitrógeno, tanques de almacenamiento y una circuitería adecuada para el transporte de nitrógeno. El primer compresor recoge aire y lo presuriza. Este aire se procesa, extrayendo el nitrógeno necesario (planta de nitrógeno), que vuelve a ser presurizado y puesto a punto para su uso en el autoclave.

2.2.6 Sistema de vacío

Este sistema proporciona el vacío en las bolsas que recubren las piezas de composite a fabricar. Está formado por bombas de vacío, tanques de amortiguación y líneas de medida y succión.

2.2.7 Sistema de carga

Permite la introducción y posicionamiento de las piezas en el autoclave. Consiste en una serie de plataformas de carga que permiten colocar de forma correcta las piezas a curar en el autoclave. En función del tamaño de las piezas a procesar se utilizan coches de tres o cuatro niveles en los que colocarlas exprimiendo la máximo el volumen del depósito disponible.

2.2.8 Sistema eléctrico

Es el encargado de proporcionar la energía a todo el conjunto.

2.2.9 Sistema de control

Está compuesto de controladores que gobiernan la temperatura, presión y nivel de vacío en el autoclave, permitiendo modificar en todo momento las condiciones de las piezas en su interior. Procesan las señales provenientes de los sensores colocados en el autoclave.

2.3 Proceso físico

Todo un conjunto de piezas de debe ser procesado dentro del autoclave durante un intervalo isotérmico mínimo predefinido (Cure Cycle Time, t_2-t_1). La siguiente figura representa un tiempo de ciclo típico de tres fases para una pieza en el autoclave para un tiempo t :

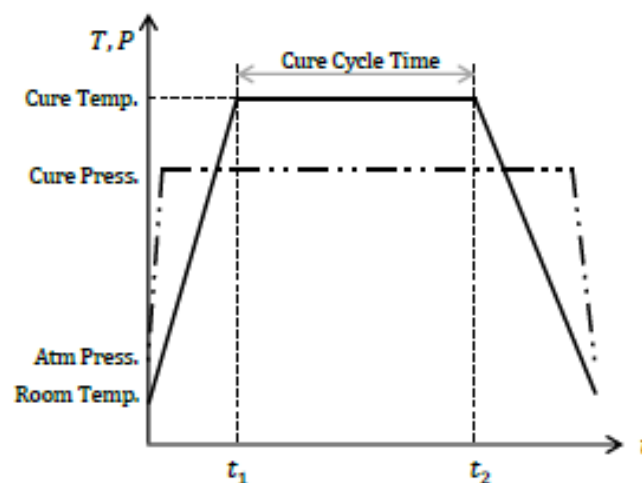


Figura 2-7: Ciclo de temperatura estándar T y presión P

Con el objetivo de conseguir economías de escala, las piezas que presentan las mismas condiciones de temperatura y presión, es decir, el mismo ciclo de cura, se procesan juntas en lotes. Es común encontrar lotes de piezas formados por conjuntos de piezas heterogéneas con distintos índices de transferencia de calor. Esto implica que alcanzarán sus respectivas temperaturas de curado en momentos distintos. La siguiente figura (figura 2.8) muestra un ejemplo para un lote de 5 piezas.

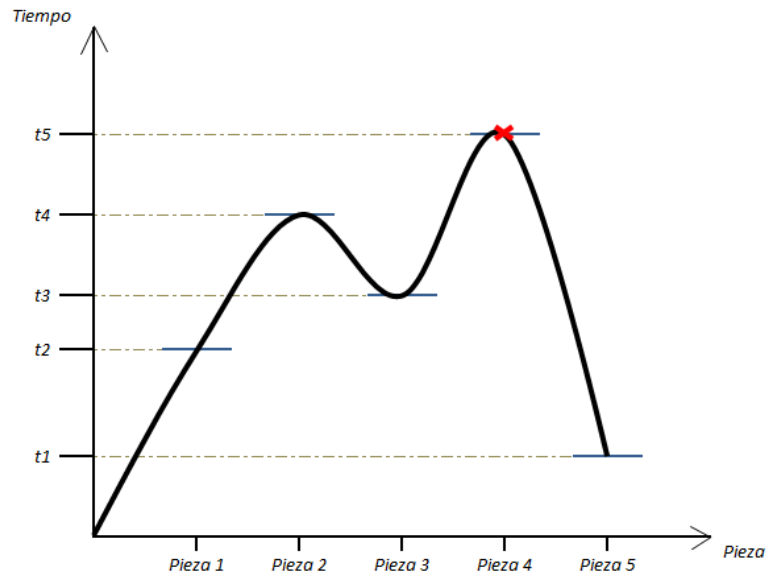


Figura 2-8: Ejemplo de tiempos de curado para un lote de pieza

Dentro de un conjunto de piezas el mayor tiempo de curado es el más restrictivo y es el que marca el tiempo de ciclo del lote. El intervalo de tiempo desde que la primera pieza alcanza su temperatura de curado hasta que lo hace la última se denomina sobreexposición o retraso máximo. Este retraso máximo depende en gran medida de la posición de las piezas en el autoclave. Por lo tanto, podemos decir que el proceso de curado de un lote depende de:

- La posición de las piezas en el autoclave. Las piezas más cercanas a al lado de emisión del gas caliente se calentarán antes que las más lejanas.
- La propia orientación de las piezas y su orden en el lote ya que pueden producir sombras e inactividad que afectan al proceso.
- Los índices de transferencia de calor de las piezas. Las piezas pueden tener diferentes formas, grosores y materiales que afecten a la capacidad global de transferir calor.

El retraso asociado a cada pieza depende de los siguientes parámetros:

- Las características térmicas de cada tipo de pieza.
- Las posiciones vertical y horizontal de la pieza.
- Los efectos de sombra o el estancamiento de gas entre piezas.

Así, para una distribución determinada de piezas en el autoclave, el retraso individual de cada pieza puede ser calculado fácilmente, e igualmente por tanto, el retraso máximo del lote completo.

2.4 Proceso de curado

El proceso de curado de materiales compuestos de matriz polimérica termoestable reforzada con fibras continuas se consigue exponiendo al composite a elevadas temperaturas y presiones durante un periodo determinado de tiempo (*ciclo de curado*).

Las altas temperaturas que se aplican, proporcionan el calor necesario para que se desarrollen las reacciones químicas en la resina. La presión aplicada, proporciona la fuerza para extraer el exceso de resina en el material, mantener unidos los laminados y comprimir y expulsar los huecos de aire que se puedan generarse.

2.4.1 Preparación de las piezas

Previamente a introducir los laminados a curar en el autoclave es preciso añadirles unas capas que los protejan, permitan generar el vacío y evacuar los excesos de resina como se ha explicado anteriormente. Usualmente estas capas suelen ser:

- **Peel-ply:** Se aplica inmediatamente después del laminado. Proporciona un acabado superficial óptimo a la pieza. Generalmente está fabricada de nilón, poliéster o fibra de vidrio.
- **Separador (Separator):** Se sitúa después del peel-ply. Permite la expulsión de los gases del laminado y que los excesos de resina fluyan hasta el sangrado. Además, en función del material empleado proporciona características a la superficie de la pieza. Se suelen utilizar materiales porosos como el teflón.
- **Sangrado (Bleeder):** Esta capa absorbe el exceso de resina del laminado durante el curado con el objetivo de encontrar el volumen de fibras deseado. Se utilizan materiales por lo tanto absorbentes como telas de fibra de vidrio, aunque depende de la cantidad de resina que se desee absorber. También, en función de la cantidad de absorción de resina que se desee, se tiene en cuenta el espesor de esta capa.
- **Barrera (Barrier):** Este material, no adhesivo, se coloca entre el bleeder y el breather y se utiliza para controlar la resina que se extrae de la pieza. Esta capa evita que la resina escape del bleeder y que afecte al funcionamiento del resto de capas. Normalmente se utiliza teflón o tedlar.
- **Respiradero (Breather):** Esta capa se sitúa tras la barrera para permitir la aplicación uniforme de la presión de vacío sobre el laminado y la expulsión de gases atrapados en él.
- **Dique (Dam):** se coloca a veces para minimizar el sangrado en los bordes. Puede ser una parte integral del utillaje o colocarse de forma separada usando barras de metal, teflón o silicona.
- **Bolsa de vacío (Vacuum bag):** Se encarga de contener la presión de vacío aplicada al laminado antes y durante el curado y de transmitir la presión externa a la pieza en el autoclave. Además, evita que los gases presurizados en el autoclave penetren en la pieza produciéndole porosidades y defectos. Cuenta con una toma de entrada por la cual se realiza el vacío. Para asegurar el correcto cierre se utilizan también sellantes.

A la hora de preparar las piezas también se debe tener en cuenta la colocación de termopares que permiten el control de la temperatura de las piezas en todo momento.

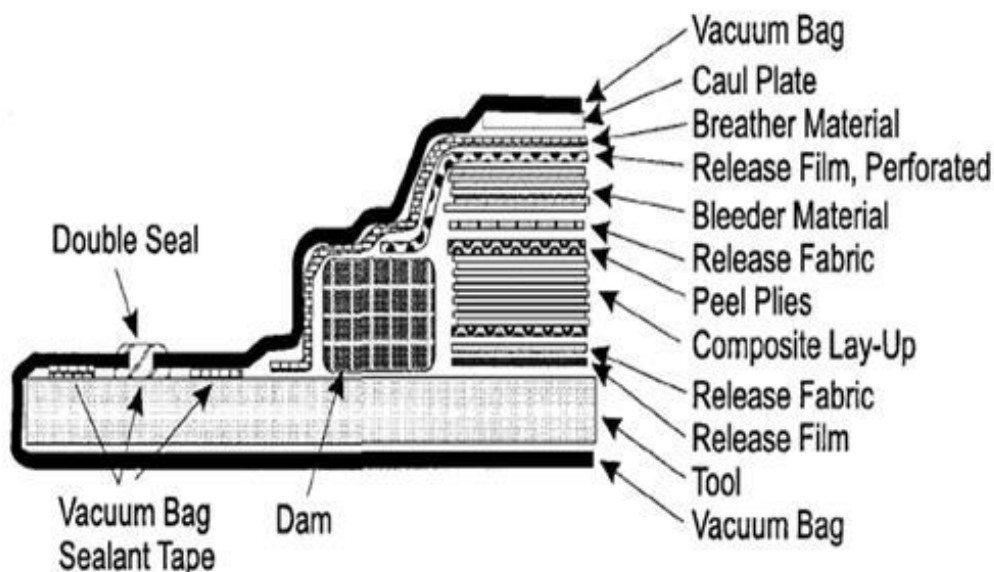


Figura 2-9: Esquema de las capas de la preparación de las piezas

2.4.2 Etapas

El proceso de curado en autoclave se realiza en las siguientes etapas (Figura 2.10):

2.4.2.1 Etapa 1

Esta primera etapa es de calentamiento a la vez que la presión en el interior del autoclave se incrementa. La primera subida y mantenimiento de presión se realiza para que la viscosidad disminuya y el exceso de resina fluya hacia el sangrado. Un segundo aumento de presión se aplica para que la polimerización de la resina se inicie, suponiendo un fuerte aumento de su viscosidad. Esta etapa finaliza cuando todas las piezas alcanzan la temperatura y la presión establecidas, es decir, cuando todos los termopares alcanzan la temperatura final deseada.

2.4.2.2 Etapa 2

Esta segunda etapa el autoclave mantiene la temperatura y presión alcanzados en la primera fase hasta que se produce la consolidación y curado del material.

2.4.2.3 Etapa 3

En esta última etapa se reduce la temperatura para que el exceso de calor, producido por el curado, se reparta de forma uniforme por la pieza. Por el contrario, la presión se mantiene constante para prevenir la formación de huecos. La presión disminuye y se extrae la pieza del autoclave una vez el curado haya terminado y la temperatura de la pieza haya descendido lo suficiente.

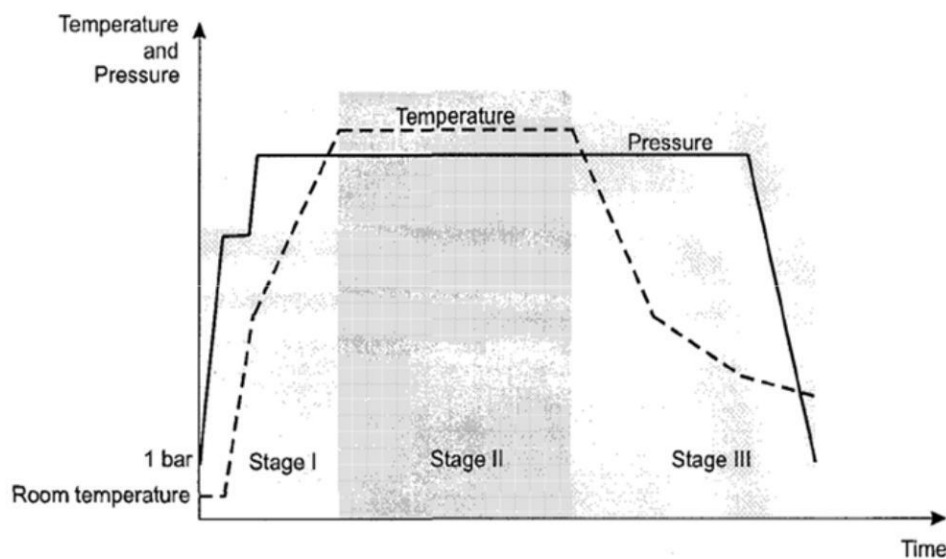


Figura 2-10: Temperatura y presión durante el curado en autoclave

2.4.3 Variables

El proceso de curado de materiales compuestos presentan cierta dificultad. Ésta es debida a los factores iniciales (tiempo, temperatura, diseño...) que afectan a las propiedades deseadas del material e interaccionan entre ellos en relaciones complejas y no lineales. La figura 2.11 muestra estas relaciones con algunos factores iniciales, afectando a la consolidación y calidad de las piezas:

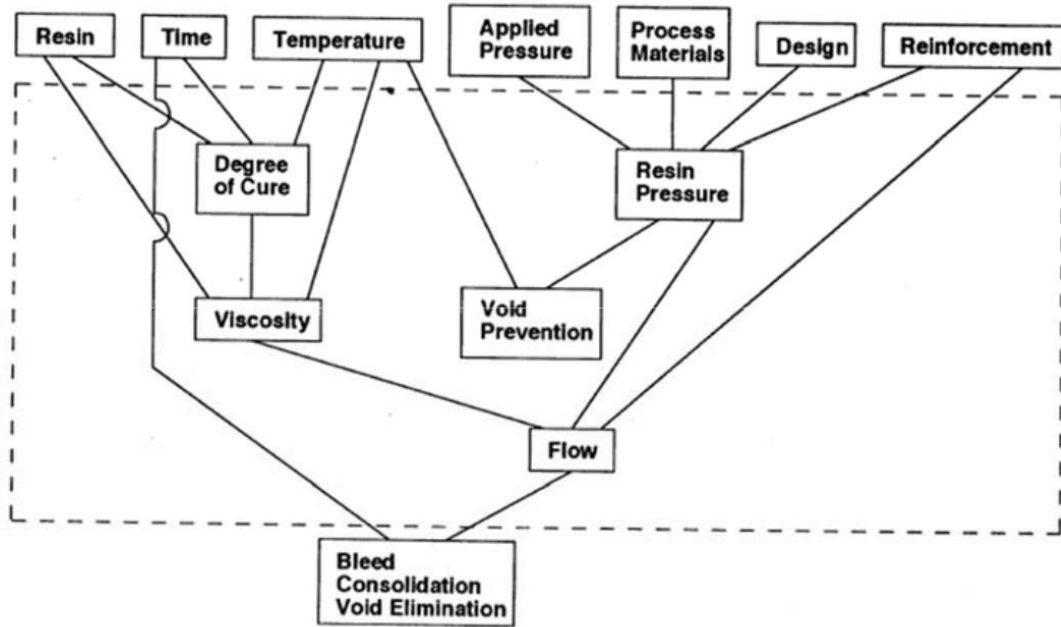


Figura 2-11: Variables del proceso de curado

2.4.3.1 Grado de curado

El grado de curado se expresa como:

$$\alpha = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_R}$$

Siendo:

- ΔH_t : Entalpía liberada en un instante t .
- ΔH_R : Entalpía total necesaria para el curado total de la pieza.

Así $\alpha=0$ especifica el inicio de curado y $\alpha=1$ su fin. El grado de curado varía con el tiempo y en función de cómo se le aplique calor a la pieza. Otro elemento útil de conocer es la generación de calor durante la reacción de curado. El calor generado por unidad de volumen se define de la siguiente forma:

$$Q = \rho H_R \frac{d\alpha}{dt}$$

Siendo:

- ρ : Densidad de la resina (Kg/m^3).
- H_R : Calor específico de la reacción (W/Kg).
- $d\alpha/dt$: Variación del grado de curado de la resina.

2.4.3.2 Viscosidad

La viscosidad de la resina depende del tipo de resina, del grado de curado y la temperatura. En los termoestables las resinas experimentan reacciones químicas que provocan que su composición esté permanentemente cambiando durante el curado. Por eso, la viscosidad de una resina a una temperatura dada aumenta conforme pasa el tiempo.

2.4.3.3 Presión de la resina

La presión de la resina permite extraer los gases que hayan podido quedar atrapados en ésta. La presión que experimenta la resina no es la aplicada al laminado, sino que es función de ésta, de los materiales que se

emplean para el curado, el diseño del laminado y el refuerzo.

2.4.3.4 Prevención de huecos

La prevención de huecos debe llevarse a cabo antes de que se produzca la gelificación de la resina, pues a partir de ese momento, aunque continúe el curado, no existe flujo de resina. La prevención de huecos que se lleva a cabo con la presión aplicada a la resina, permite la maximización de la resistencia mecánica de los materiales compuestos y asegura la consistencia del material.

2.4.3.5 Flujo

El flujo de resina presentará una forma determinada en función de cómo varíen la viscosidad y los refuerzos, que pueden interpretarse como frenos para el flujo de resina, y de cómo lo haga la presión de la resina, que se asemeja a un acelerador.

3 ENTORNO DE TRABAJO

En este capítulo se describen los elementos que conforman nuestro entorno de trabajo, basado en los estudios y análisis llevados a cabo por Maffezzoli y Grieco (2013): autoclave, piezas, penalizaciones y escenarios.

3.1 El autoclave

El autoclave utilizado en este trabajo cuenta con un sistema de calentamiento por flujo de hidrógeno y presenta una longitud de 10.25 m y un diámetro de 3.5m (Figura 3.1). Como se aprecia en la figura el sistema de referencia que se emplea tiene como eje 'y' el que atraviesa el autoclave longitudinalmente, como 'z' el perpendicular al suelo y como eje 'x' el perpendicular a los dos anteriores.

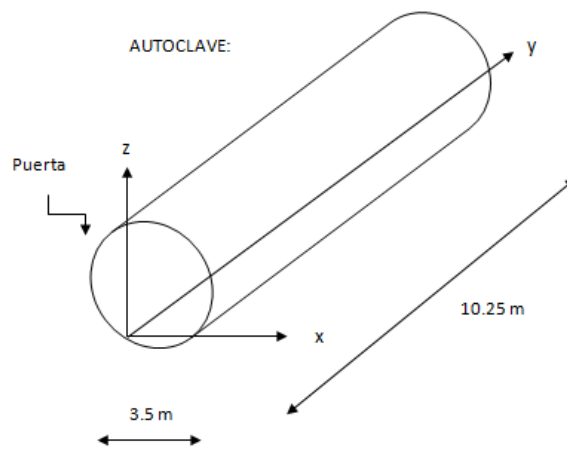


Figura 3-1: Dimensiones autoclave

El autoclave puede cargarse con hasta tres coches, numerados de 1 al 3 desde la puerta de apertura hasta la pared final del autoclave, de 3240x2150x2770 mm cada uno. Estos carros de hasta cuatro niveles, numerados en orden creciente comenzando desde el más bajo hasta el más alto están separados entre sí 565 mm y pueden adaptarse según convenga, pudiéndose emplear uno, dos, tres o cuatro niveles en cada carro. La figura 3.2 muestra esta distribución.

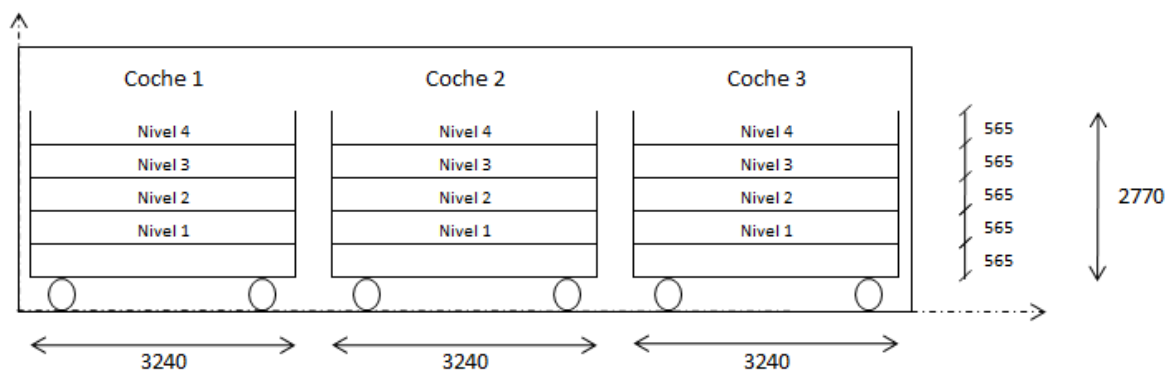


Figura 3-2: Distribución autoclave

Cada uno de estos niveles presenta dos bandejas, *Bandeja 1* y *Bandeja 2*, divididas a su vez en 10 zonas, resultado de dos posiciones disponibles a lo largo del eje x ($nv=2$) y de otras cinco a lo largo del eje y ($nh=5$). Como se verá posteriormente, para posicionar las piezas se utilizan las coordenadas 'x' e 'y' definidas para cada bandeja, simulando las alturas 'z' en función de los niveles de los carros.

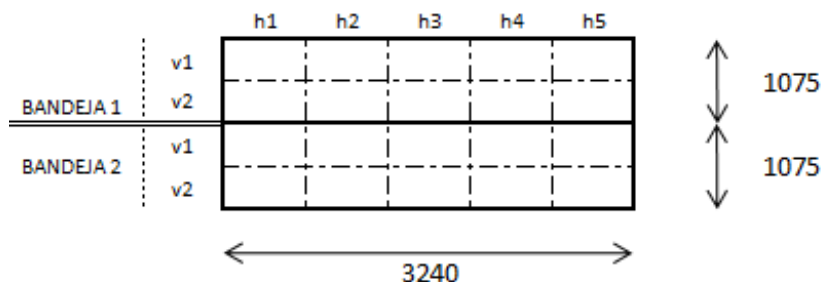


Figura 3-3: Distribución de los niveles

El nivel en el que se encuentra una pieza define la coordenada z de localización, por eso utilizamos las coordenadas x e y para describir la posición dentro de una bandeja.

3.2 Particularidades

3.2.1 Materiales a procesar

Las piezas utilizadas se componen de:

- Laminado o panel de sándwich de preimpregnados con los termopares colocados.
- Bolsa de vacío que recubre el laminado con su correspondiente entrada de vacío y capas auxiliares (separador, barrera, etc).
- Utillaje sobre el que descansa toda la pieza.

Los preimpregnados utilizados y sus características se recogen en la siguiente tabla:

Nombre	Tipo	Contenido de resina en peso [%]	Tiempo de gelificación a 127°C [min]	Espesor de la capa[mm]
G1	Fibras de vidrio	45 ± 3	4 ± 2	0.104
G2	Fibras de vidrio	38 ± 2	4 ± 2	0.241
K1	Fibras de kevlar	57 ± 3	6 ± 2	0.104
K2	Fibras de kevlar	52 ± 3	6 ± 2	0.267
C1	Cintas de carbono	40 ± 2	4 ± 2	0.104

Tabla 3-1: Propiedades de los impregnados utilizados

3.2.2 Ciclo de curado

Las características del ciclo de curado simulado son:

1. Vacío mínimo de 560 mmHg dentro de las bolsas de vacío.
2. La presión del autoclave se establece en $3.16 \cdot 10^5 \pm 0.35 \cdot 10^5$ Pa.
3. Cuando la presión alcanza 1 bar, el vacío se elimina.
4. Rampas de calentamiento con las siguientes tolerancias: tasa de calentamiento en el rango de 1.2–4.4°C/min entre 54 y 88°C; tasa de calentamiento en el rango de 0.56–4.4°C/min entre 88 y 111°C; tasa de calentamiento en el rango de 0.16–4.4°C/min entre 11 y 122°C.

5. Proceso isotérmico para cada laminado a la temperatura de curado de $127 \pm 5^\circ\text{C}$ durante al menos 90 minutos. El termopar que indique la temperatura más baja es el que se toma de referencia para la determinación del tiempo a una temperatura constante.
6. Rampa de enfriamiento hasta unos 50°C con una tasa máxima de $2.8^\circ\text{C}/\text{min}$.

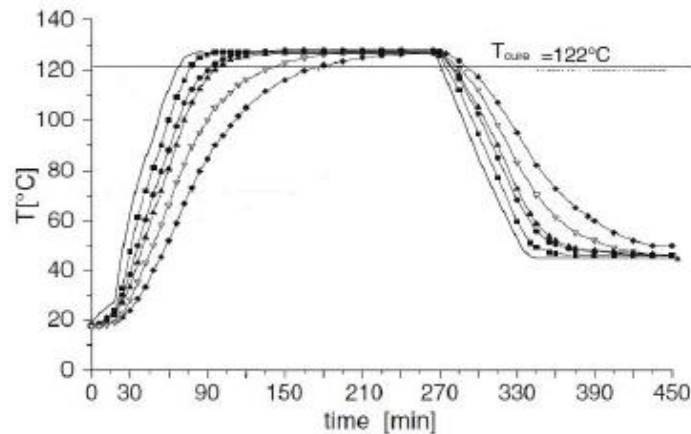


Figura 3-4: Perfiles de curado representativos medidos durante un ciclo de curado en autoclave.

3.2.3 Utillaje

Las herramientas utilizadas en la simulación son de aluminio y se clasifican en seis diferentes grupos en función de sus dimensiones y forma:

- **Tipo A:** Este útil está compuesto por una placa curva de 2.5-5.5 mm de espesor fijada a la base por unos soportes agujereados para mejorar la transmisión del calor.

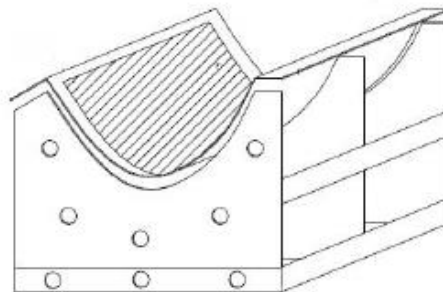


Figura 3-5: Utillaje tipo A

- **Tipo B:** Útil compuesto por una placa de dimensiones laterales diferentes, con un espesor de entre 13 y 25 mm, sujeta a la base por un marco de 100-250 mm con agujeros.

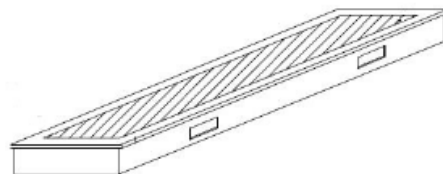


Figura 3-6: Utillaje tipo B

- **Tipo B1:** Igual que el tipo B pero con un espesor de placa entre 26 y 40 mm y sin agujeros.
- **Tipo C:** Compuesto por una placa con un espesor entre 15 y 25 mm sin soportes. También pertenecen a este grupo los soportes de varias piezas pequeñas.

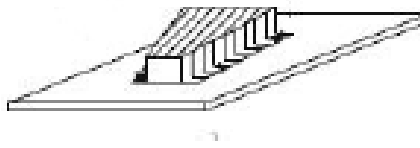


Figura 3-7: Utillaje tipo C

- **Tipo C1:** Igual que el tipo C pero con un espesor de 40 mm.
- **Tipo D:** Igual que el tipo B pero con un espesor comprendido entre 100 y 110 mm.

3.3 Piezas

De ahora a continuación el término pieza se referirá al conjunto formado por el laminado, los materiales auxiliares y el utillaje.

Se distinguen cuatro tipos de piezas a procesar diferenciadas por sus características térmicas y físicas (Tabla 3.2).

Tipo de utillaje	Espesor de utillaje [mm]	Tipo de pieza
A	2.5 – 5.5	α
B	13 – 25	β
B1	13	β
C	15 – 25	β
B	40	γ
B1	20 – 40	γ
C1	40	γ
D	105	δ

Tabla 3-2: Clasificación de piezas

Además, se tiene una versión especial de piezas tipo α de mayores dimensiones, las piezas α' .

A la hora de considerar las piezas se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis:

1. Todas las piezas se suponen rectangulares en planta. Esto significa que, en caso de que no lo son, se definen de tal forma que sea posible contenerlas dentro de un rectángulo de medidas inferiores a las bandejas del autoclave.
2. Las dimensiones de las piezas (largo y ancho) se suponen menores o iguales a las de las bandejas, de tal manera que pueda colocarse al menos una pieza por bandeja. La única excepción, como se explicará más adelante, las piezas α' .
3. Todas las piezas presentan una altura menor a la distancia existente entre niveles excepto, de nuevo, las piezas α' que si podrán sobrepasar esta distancia y por eso son colocadas en coches de un solo nivel.

4. Se supone que las piezas pueden colocarse paralelas al largo de las bandejas (*eje y*) o perpendicular a él (*eje x*) sin que sus propiedades térmicas varíen. Por lo tanto pueden colocarse en una posición u otra según convenga. Además, se asume que existen suficientes tomas de vacío para utilizar en todas las piezas independientemente de sus posiciones.
5. No se tienen en cuenta las interferencias consecuencia de las posiciones relativas de unas piezas respecto a las otras del mismo nivel. Sólo se considerarán los coeficientes de interferencia en el caso de existir piezas α' .

3.3.1 Piezas α'

Como ya se ha comentado las piezas α' presentan un tamaño que hace necesario que se coloquen en un carro con un único nivel. Este tipo de piezas se diferencia del resto en que algunas de sus dimensiones sobrepasan las disponibles en un carro. Son entonces piezas α' aquellas cuya altura excedieran los 565 mm existente entre los niveles o aquellas cuyos largo o anchos excedieran las dimensiones de las bandejas (3240x1075 mm).

Al tratarse de piezas tipo α , que presentan la menor penalización por tipo como se detallará más adelante, y no poderse colocar junto con el resto de piezas de manera general, este tipo de piezas no afectarán en la resolución del problema propuesto en este trabajo. Esto es porque, sea cual sea el coche en el que se coloquen, nunca serán de las piezas que necesitarán más tiempo de procesado.

Las dimensiones de este tipo de piezas hacen que en los coches de un único nivel sólo puedan colocarse dos de ellas. Así, sólo podrán procesarse un total de cuatro piezas α' dejando un solo carro para el resto de piezas. Se reservan entonces los carros 2 y 3 con un solo nivel para este tipo de piezas y el carro 1 se reserva para el resto de piezas.

Otro de los aspectos a considerar en las piezas de tipo α' es su altura, responsable de la existencia de efectos de interferencia en el coche de niveles completo y por tanto, de la utilización de los coeficientes de interferencia. Entonces, en función de la máxima altura de las piezas α' , se distinguen los siguientes casos (Figura 3.8):

- Caso 1: La pieza α' no sobrepasa el primer nivel del carro.
- Caso 2: La pieza α' sobrepasa el primer nivel del carro.
- Caso 3: La pieza α' sobrepasa el segundo nivel del carro.
- Caso 4: La pieza α' sobrepasa el tercer nivel del carro.

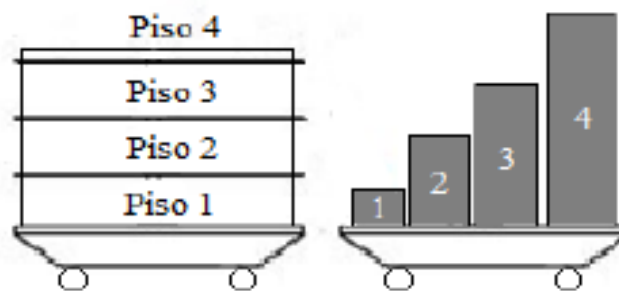


Figura 3-8: Posibles casos según la altura máxima de piezas α'

3.4 Penalizaciones

Se definen los coeficientes de penalización globales como el retraso de tiempo que invierte una pieza i colocada en una posición j en alcanzar la temperatura de curado. El factor determinante que afecta

al tiempo final de procesado es el retraso entre la temperatura del gas en el autoclave y la temperatura de las piezas. Estos coeficientes se determinan a partir de los retrasos de tiempo experimentales observados para cada pieza, geometría y posición en el autoclave. En la figura 4.4 se observa estos retrasos. Por otro lado el gas en el interior del autoclave sigue un perfil de temperaturas (línea continua de la figura), el resto de piezas, caracterizadas por diferentes tasas de calentamiento, presentan perfiles con distintas velocidades (resto de

líneas de la figura), siendo el más lento el responsable del tiempo total empleado en el proceso de curado.

La tasa de calentamiento dentro del autoclave depende de dos factores: el tipo de pieza y su posición. Definimos entonces como coeficientes de penalización globales como el producto del dependiente por tipo de pieza y otro por la posición:

$$\rho_{ij} = \rho_{pieza,i} \cdot \rho_{pos,j}$$

La siguiente tabla recoge los valores de penalización para cada tipo de pieza, ρ_i' a partir de ahora, basados en experimentos empíricos:

Tipo de pieza	Penalización (ρ_i')
α	1
β	6
γ	7
δ	15

Tabla 3-3: Penalizaciones por tipo de piezas (ρ_i')

El otro coeficiente de penalización, p_{ijvh} , se basa en la localización exacta de la pieza en el autoclave. Los subíndices $j=(c,d,t)$ y v,h proporcionan una posición única de una pieza en el autoclave, siendo:

- $c \in C = \{1, 2, 3\}$: Conjunto de carros disponibles en nuestro autoclave.
- $d \in D = \{1, 2, 3, 4\}$: Conjunto de niveles disponibles en cada coche.
- $t \in T = \{1, 2\}$: Bandejas disponibles en cada nivel.
- $v \in V = \{1, 2\}$: Conjunto de divisiones verticales en una bandeja, paralelas al eje x.
- $h \in H = \{1, 2, 3, 4, 5\}$: Conjunto de divisiones horizontales en una bandeja, paralelas al eje y.
- Estos coeficientes se muestran en la siguiente tabla:

Deck (d)	Tray (t)	Pos. (v)\(h)	Cart (c)																		
			1					2					3								
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5				
1	1	1	1	2,5	3	3	3	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
1	1	2	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
1	2	1	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
1	2	2	1	2,5	3	3	3	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
2	1	1	1	2,5	3	3	3	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
2	1	2	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
2	2	1	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
2	2	2	1	2,5	3	3	3	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
3	1	1	1	2,5	3	3	3	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
3	1	2	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
3	2	1	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16
3	2	2	1	2,5	3	3	3	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
4	1	1	1,95	4,875	5,85	5,85	5,85	5,85	5,85	5,85	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24
4	1	2	1,5	3,75	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
4	2	1	1,5	3,75	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
4	2	2	1,95	4,875	5,85	5,85	5,85	5,85	5,85	5,85	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24

Tabla 3-4: Penalización p_{ijvh} con respecto a la posición de la pieza

En los escenarios que presentan piezas α' se debe utilizar una tabla distinta (Tabla 3.5):

Deck (d)	Tray (t)	Pos. (v)\(h)	Cart 1																	
			3.a)					3.b)					3.c)							
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
1	1	1	1	1	1,5	3,2	3,2				1	1	1,5	3,2	3,2	1	1	1,5	3,2	3,2
1	1	2	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16				1,3	1,3	1,95	4,16	4,16	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16
1	2	1	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16				1,3	1,3	1,95	4,16	4,16	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16
1	2	2	1	1	1,5	3,2	3,2				1	1	1,5	3,2	3,2	1	1	1,5	3,2	3,2
2	1	1	1	1	1,5	3,2	3,2				1	1	1,5	3,2	3,2	1	1	1,5	3,2	3,2
2	1	2	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16				1,3	1,3	1,95	4,16	4,16	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16
2	2	1	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16				1,3	1,3	1,95	4,16	4,16	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16
2	2	2	1	1	1,5	3,2	3,2				1	1	1,5	3,2	3,2	1	1	1,5	3,2	3,2
3	1	1	1	1	1,5	3,2	3,2				1	1	1,5	3,2	3,2	1	2,5	3	3	3
3	1	2	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16				1,3	1,3	1,95	4,16	4,16	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9
3	2	1	1,3	1,3	1,95	4,16	4,16				1,3	1,3	1,95	4,16	4,16	1,3	3,25	3,9	3,9	3,9
3	2	2	1	1	1,5	3,2	3,2				1	1	1,5	3,2	3,2	1	2,5	3	3	3
4	1	1	1,95	4,88	5,85	5,85	5,85				1,5	1,5	2,25	4,8	4,8	1,95	4,875	5,85	5,85	5,85
4	1	2	1,5	3,75	4,5	4,5	4,5				1,95	1,95	2,93	6,24	6,24	1,5	3,75	4,5	4,5	4,5
4	2	1	1,5	3,75	4,5	4,5	4,5				1,95	1,95	2,93	6,24	6,24	1,5	3,75	4,5	4,5	4,5
4	2	2	1,95	4,88	5,85	5,85	5,85				1,5	1,5	2,25	4,8	4,8	1,95	4,875	5,85	5,85	5,85

Tabla 3-5: Penalización p_{ijvh} en presencia de piezas α'

Los coeficientes recogidos en esta tabla corresponden únicamente a piezas colocadas en el primer carro; recordamos que los carros 2 y 3 se reservan para las piezas α' . La subtabla 3.a) corresponde a las penalizaciones en el caso de que la altura máxima de las piezas α' se encuentre entre los 1130 mm y los 1695 mm. De igual manera en la subtabla 3.b) se recogen las penalizaciones para los casos en los que la altura máxima de las piezas α' se encuentra entre los 1696 mm y los 2260mm. Por último, para alturas máximas entre los 565 mm y los 1130 mm de las piezas α' tenemos los coeficientes recogidos en la subtabla 3.c).

Debemos apreciar que no existe diferencia entre colocar una pieza en una bandeja u otra. Las penalizaciones se asignan a las piezas en función de la posición que ocupen sus puntos más desfavorables. El punto más desfavorable de cada pieza se corresponde, en su coordenada y, con el más alejado de la puerta de apertura y, en su coordenada x, varía de unos niveles a otros. En el caso que la pieza se encuentre en alguno de los 3 primeros niveles, el punto más desfavorable se encontrará en la zona interior, mientras que en el cuarto piso será la zona exterior.

La siguiente figura representa un ejemplo de colocación en un nivel del 1 al 3 de una pieza (rectángulo de color gris), a la que se le asigna una penalización en función de su posición. El círculo rojo indica la coordenada que define la penalización por posición de la pieza.

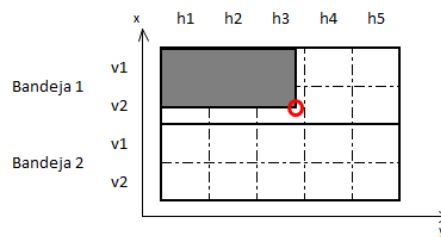


Figura 3-9: Ejemplo de colocación de una pieza

En nuestro problema el tiempo de ciclo está establecido por el retraso máximo de las piezas más 90 minutos requeridos desde que la última pieza alcanza su temperatura de curado.

3.5 Escenarios

Nuestro estudio se basa en 6 escenarios diferentes, que ya fueron analizados anteriormente por Dios (2015) y Dios *et al.*2016. Los tres primeros son escenarios reales obtenidos por Maffezzoli y Grieco (2013), mientras que los otros tres son escenarios teóricos de casos especiales que podrían suceder en la práctica.

Las características de los distintos escenarios se recogen en las siguientes tablas:

Pieza	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
	Dimensiones [mm]	Tipo	Dimensiones [mm]	Tipo	Dimensiones [mm]	Tipo
1	1880x3500x1500	α'	780x2400x170	β	900x2880x1750	α'
2	900x1200x80	β	800x2550x180	β	1100x1620x1330	α'
3	900x1200x140	β	800x3040x180	β	630x670x40	γ
4	640x3150x520	α	800x2550x180	β	630x670x40	γ
5	900x1200x80	β	800x3400x180	β	540x780x160	γ
6	500x1420x140	δ	640x3000x190	γ	540x780x160	γ
7	500x1420x140	δ	800x2550x190	β	540x780x160	γ
8	800x2250x200	β	640x3230x90	γ	540x780x160	γ
9	910x1100x240	β	550x640x540	α	560x2450x240	α
10	900x1110x240	β	630x1900x188	β	880x780x15	β
11	950x1640x240	β	750x1050x340	α	1000x800x80	β
12	800x3040x200	β	950x3100x180	β	1600x1360x1000	α'
13	880x880x830	α'	1000x630x120	β	2260x1460x600	α'
14	1000x1000x1510	α'	1000x630x120	α		
15	2330x1830x1200	α'	600x3100x180	β		
16			690x2200x200	β		
17			750x670x40	γ		
18			690x240x200	β		
19			1000x600x120	β		
20			640x3230x190	β		
21			640x3230x190	β		
22			640x3230x190	β		
23			2140x680x150	β		
24			680x2140x150	α		
25			680x2140x150	β		
26			680x2140x150	α		

Tabla 3-6: Detalles de las piezas para los escenarios 1-3.

	ESCENARIO 4		ESCENARIO 5		ESCENARIO 6	
Pieza	Dimensiones [mm]	Tipo	Dimensiones [mm]	Tipo	Dimensiones [mm]	Tipo
1	780x2400x170	β	900x1200x80	β	780x2400x170	β
2	800x2550x180	β	900x1200x140	β	800x2550x180	β
3	800x3040x180	β	640x3150x520	α	800x3040x180	β
4	800x2550x180	β	1500x2000x500	α'	800x2550x180	β
5	800x3100x180	β	540x780x160	γ	800x3100x180	β
6	640x3000x190	γ	540x780x160	γ	640x3000x190	β
7	800x2550x190	β	540x780x160	γ	800x2550x190	β
8	640x3230x90	γ	540x780x160	γ	640x3230x90	γ
9	550x640x540	α	630x670x40	γ	550x640x540	α
10	630x1900x188	β	630x670x40	γ	630x1900x188	β
11	750x1050x340	α	780x880x15	β	750x1050x340	β
12	950x3100x180	β	780x880x15	β	950x3100x180	β
13	630x1000x120	β	780x880x15	β	630x1000x120	β
14	630x1000x120	β	1500x2000x500	α'	630x1000x120	β
15	600x3100x180	β	750x1050x340	α	600x3100x180	γ
16	690x2200x200	β	640x3230x190	γ	690x2200x200	β
17	670x750x40	γ	1500x2000x600	α'	670x750x40	β
18	690x2400x200	β				
19	600x1000x120	β				
20	640x3230x190	β				
21	640x3230x190	β				
22	640x3230x190	β				
23	680x2140x150	β				
24	680x2140x150	β				
25	680x2140x150	β				
26	680x2140x150	β				
27	680x2140x150	β				

28	640x3000x190	δ						
29	670x750x40	δ						
30	670x750x40	β						

Tabla 3-7: Detalles de las piezas para los escenarios 4-6.

4 REVISIÓN DE LA LITERATURA EXISTENTE

Tras haber descrito en el capítulo anterior el entorno de trabajo en el que se desarrolla este trabajo pasamos ahora a realizar una revisión bibliográfica de problemas similares al nuestro.

Sobre el problema de optimización del proceso de fabricación de piezas de material compuesto en autoclave existe poco material a excepción del modelo de optimización propuesto por Dios (2015) y Dios *et al.* (2016) basado en los estudios de Maffezzoli y Grieco (2013).

La principal dificultad reside en obtener la función objetivo del problema, es decir, en averiguar cómo influye el calentamiento en las piezas que conforman un lote de curado. Este problema se tiene cierto parecido con los problemas de tipo Bin Packing.

4.1 Modelado matemático

Para la resolución del problema la propuesta en *Modelado y resolución del problema de distribución óptima de piezas en un autoclave* (Dios, 2015) es un modelo de programación lineal (MILP: Mixed Integer Lineal Program) que optimice la distribución de composites en un autoclave. El entorno de trabajo utilizado para este modelo es el mismo que hemos empleado en nuestro trabajo.

El objetivo es alcanzar la mejor posición y orientación de las piezas del lote de composites para su cura en el autoclave. El problema estudiado es clasificado como 2D (bidimensional) BPP, donde los carros son considerados contenedores, en el que se considera las penalizaciones por tipo de pieza y por posición en el autoclave.

Los parámetros y variables utilizadas en el modelo se definen a continuación:

- Conjuntos e índices
 - $i, k \in I = \{1, \dots, n_i\}$ Conjunto de piezas en el lote.
 - $c \in C = \{1, \dots, n_c\}$ Conjunto de coches disponibles.
 - $d \in D = \{1, \dots, n_d\}$ Conjunto de niveles en los coches.
 - $t \in T = \{1, \dots, n_t\}$ Conjunto de bandejas en cada nivel.
 - $v \in V = \{1, \dots, n_v\}$ Conjunto de divisiones verticales disponibles en una bandeja, paralelas al eje x.
 - $h \in H = \{1, \dots, n_h\}$ Conjunto de divisiones verticales disponibles en una bandeja, paralelas al eje y.
 - $j \in J$ Conjunto de posibles localizaciones (coche, nivel y bandeja) en el autoclave, determinado por (c, d, t) tupla, i.e. coche $c \in C$, nivel $d \in D$, bandeja $t \in T$.
- Parámetros
 - M Número arbitrariamente grande.
 - ρ Número arbitrariamente pequeño.
 - E Distancia marginal entre las piezas y los límites de las bandejas.
 - (L, W) Largo y ancho de las bandejas.
 - (l_i, w_i) Largo y ancho de la pieza i . Se considera el largo de las piezas la mayor de sus dimensiones, y el ancho de éstas la más pequeña.
 - p_{ijvh} Penalización asociada a la pieza i localizada en la posición j de una bandeja con coordenadas (v, h) .
 - p'_i Penalización asociada a cada pieza i .

- Variables
 - δ_{ijvh} Variable binaria que toma valor 1 cuando la pieza i se localiza en la posición j de una bandeja con coordenadas (v, h) , y 0 en caso contrario.
 - (x_i, y_i) Variables continuas (para localización) que indican las coordenadas de la esquina inferior izquierda (LB) de la pieza i en un nivel concreto.
 - β_i Indicador de la orientación. Variable binaria con valor 1 si el largo de la pieza i (l_i) es paralelo al eje y , y 0 en caso contrario.
 - $(r_{ik}, l_{ik}, a_{ik}, b_{ik})$ Variables binarias que toman valor 1 si la pieza i se encuentra a la derecha/izquierda/ encima/ debajo de la pieza k .
 - T^{max} Retraso máximo en el tiempo de curado para el lote completo.

Para este tipo de problemas es común que la función objetivo sea minimizar el área utilizada; en cambio, este modelo pretende minimizar el tiempo máximo de curado. El problema de localización de piezas en un autoclave está basado en los estudios realizados por Maffezzoli y Grieco (2013) y se formula con el siguiente modelo MILP:

$$\min t^{max}$$

subject to :

$$x_k + w_k \beta_k + l_k(1 - \beta_k) \leq x_i + (1 - r_{ik})M \quad \forall \{i, k\} \in I: i < k \quad (1)$$

$$x_i + w_i \beta_i + l_i(1 - \beta_i) \leq x_k + (1 - l_{ik})M \quad \forall \{i, k\} \in I: i < k \quad (2)$$

$$y_k + l_k \beta_k + w_k(1 - \beta_k) \leq y_i + (1 - a_{ik})M \quad \forall \{i, k\} \in I: i < k \quad (3)$$

$$y_i + l_i \beta_i + w_i(1 - \beta_i) \leq y_k + (1 - b_{ik})M \quad \forall \{i, k\} \in I: i < k \quad (4)$$

$$r_{ik} + l_{ik} + b_{ik} + a_{ik} \geq \sum_{v,h} \delta_{ijvh} + \sum_{v,h} \delta_{kjhv} - 1 \quad \forall i, k \in I, \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{j,v,h} \delta_{ijvh} = 1 \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$y_i + l_i \beta_i + w_i(1 - \beta_i) \leq L - \varepsilon \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$x_i + l_i(1 - \beta_i) + w_i \beta_i \leq W - \varepsilon \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$x_i + l_i(1 - \beta_i) + w_i \beta_i \geq \sum_{v,h} \frac{(v-1)W}{n_v} \delta_{ijvh} \quad \forall \{i, j\} \in \{I, J\} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x_i + l_i(1 - \beta_i) + w_i \beta_i \\ \leq \sum_{v-(n_v),h} \left(\frac{vW}{n_v} - \varrho \right) \delta_{ijvh} + W \sum_h \delta_{ijn_vh} \\ + M \left(1 - \sum_{v,h} \delta_{ijvh} \right) \end{aligned} \quad \forall \{i, j\} \in \{I, J\} \quad (10)$$

$$y_i + l_i \beta_i + w_i(1 - \beta_i) \geq \sum_{v,h} \frac{(h-1)L}{n_h} \delta_{ijvh} \quad \forall \{i, j\} \in \{I, J\} \quad (11)$$

$$y_i + l_i \beta_i + w_i (1 - \beta_i) \leq \sum_{v,h \in \{n_h\}} \left(\frac{hL}{n_h} - \varrho \right) \delta_{ijvh} + L \sum_v \delta_{ijv n_h} + M \left(1 - \sum_{v,h} \delta_{ijvh} \right) \quad \forall \{i, j\} \in \{I, J\} \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} \delta_{ijvh} \cdot p_{ijvh} \cdot p'_i \leq t^{\max} \quad \forall i \in I \quad (13)$$

$$t^{\max}, x_i, y_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (14)$$

$$\beta_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (15)$$

$$\delta_{ijvh} \in \{0,1\} \quad \forall \{i, j, v, h\} \in \{I, J, V, H\} \quad (16)$$

$$r_{ik}, l_{ik}, a_{ik}, b_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall \{i, k\} \in I: i < k \quad (17)$$

Figura 4-1: Modelo MILP

La solución al modelo aporta una distribución óptima para un conjunto de piezas dado para un proceso de curado en un autoclave. El objetivo de este modelo es el de minimizar el retraso en el ciclo de curado, es decir, minimizar el tiempo máximo para procesar un lote de piezas.

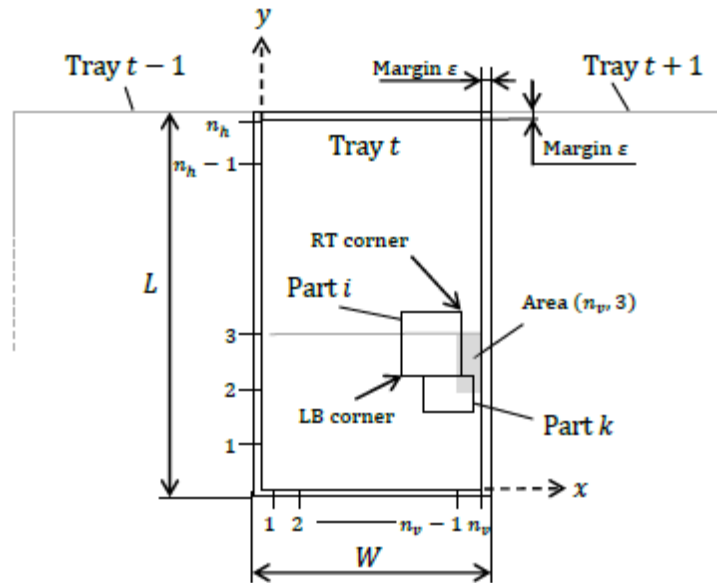


Figura 4-2: Sistema de referencias en las bandejas

Este modelo se aplica al mismo entorno de trabajo desarrollado en el capítulo 4, es decir mismo autoclave, mismos escenarios y mismas penalizaciones. Tenemos tres escenarios reales obtenidos por Maffezzoli y Grieco (2013) (Escenarios 1-3) y tres escenarios teóricos con condiciones especiales que pueden ocurrir en la práctica (Dios, 2015 y Dios *et al.*, 2016), (Escenarios 4-6).

Las siguientes figuras y tablas recogen los resultados obtenidos tras codificar este modelo en C# y aplicarlo a los distintos escenarios.

4.1.1 Escenario 1

Part #	Delay	Cart	Deck	Tray	Orientation	Tray	
	[min]	(c)	(d)	(t)	(β_t)	x_t	y_t
1	-	-	-	-	-	-	-
2	7.8	1	2	1	1	0	96
3	24.96	1	3	1	1	0	2040
4	5.85	1	4	1	1	0	90
5	24.96	1	1	2	1	0	2040
6	29.25	1	1	2	1	500	524
7	29.25	1	3	2	1	500	0
8	24.96	1	2	2	1	0	342
9	7.8	1	3	1	1	0	196
10	29.25	1	4	2	1	0	186
11	24.96	1	3	2	1	0	1600
12	24.96	1	1	1	1	0	200
13	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4-1: Resultados escenario 1

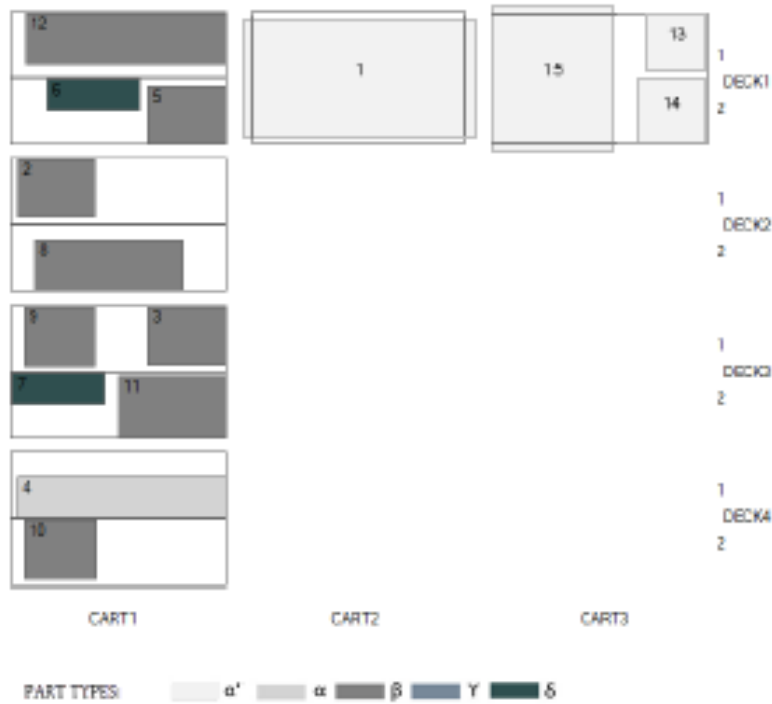


Figura 4-3: Distribución escenario 1

4.1.2 Escenario 2

Part #	Delay [min]	Cart (c)	Deck (d)	Tray (t)	Orientation Indicator (β_i)	Tray Coordinates	
						x_i	y_i
1	23.40	1	1	1	1	0	192
2	24.96	3	2	2	1	0	0
3	24.96	2	2	2	1	0	200
4	24.96	3	3	1	1	0	630
5	24.96	2	3	2	1	0	40
6	27.30	1	2	2	1	0	240
7	23.40	1	2	1	1	0	0
8	27.30	1	3	1	1	0	10
9	6.24	3	4	1	0	0	0
10	23.40	1	1	2	1	0	44
11	5.85	2	4	1	1	0	0
12	24.96	2	1	1	1	0	140
13	24.96	3	3	1	0	0	0
14	6.24	3	4	2	0	0	0
15	24.96	2	3	1	1	0	140
16	24.96	2	1	2	1	0	0
17	27.30	1	1	2	0	0	1944
18	24.96	2	2	1	1	0	0
19	11.70	1	4	1	0	0	0
20	24.96	3	3	2	1	0	10
21	24.96	3	2	1	1	0	10
22	24.96	3	1	2	1	0	10
23	23.40	1	3	2	1	0	452
24	6.240	2	4	2	1	0	0
25	24.96	3	1	1	1	0	0
26	5.85	1	4	2	1	0	0

Tabla 4-2: Resultados escenario 2

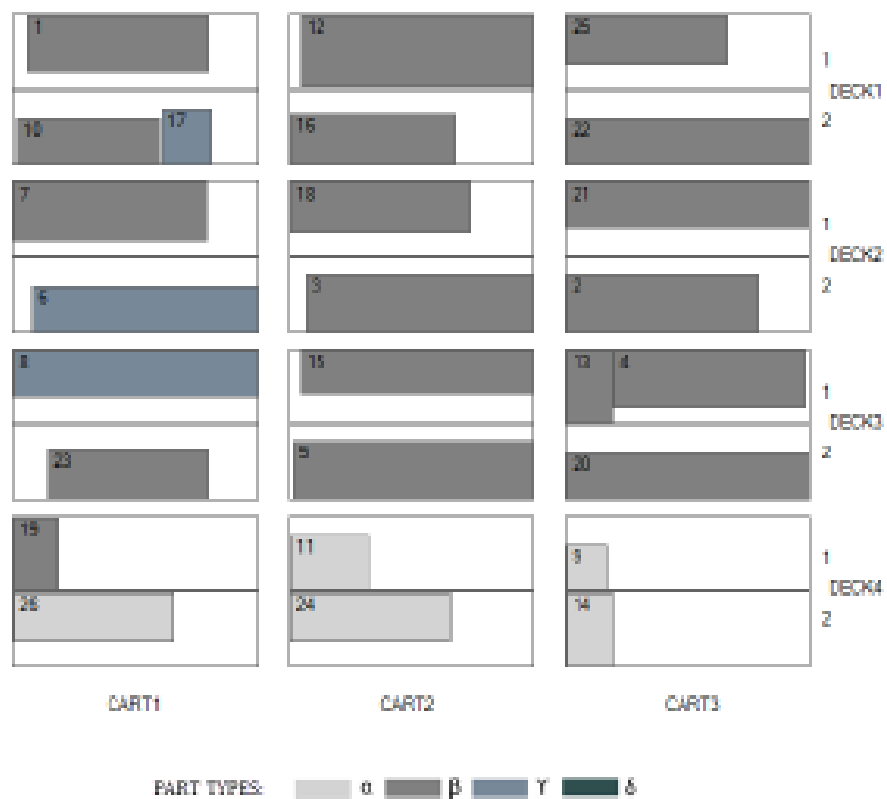


Figura 4-4: Distribución escenario 2

4.1.3 Escenario 3

Part #	Delay	Cart	Deck	Tray	Orientation Indicator	Tray Coordinates	
	[min]	(c)	(d)	(t)	(β_t)	x_t	y_t
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-
3	9.1	1	1	2	0	0	666
4	9.1	1	3	1	0	0	666
5	9.1	1	1	2	0	0	108
6	9.1	1	2	1	0	0	0
7	9.1	1	3	1	0	0	108
8	9.1	1	2	2	0	0	108
9	5.85	1	4	1	1	0	0
10	7.8	1	3	2	0	0	516
11	7.8	1	1	1	0	0	0
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4-3: Resultados escenario 3

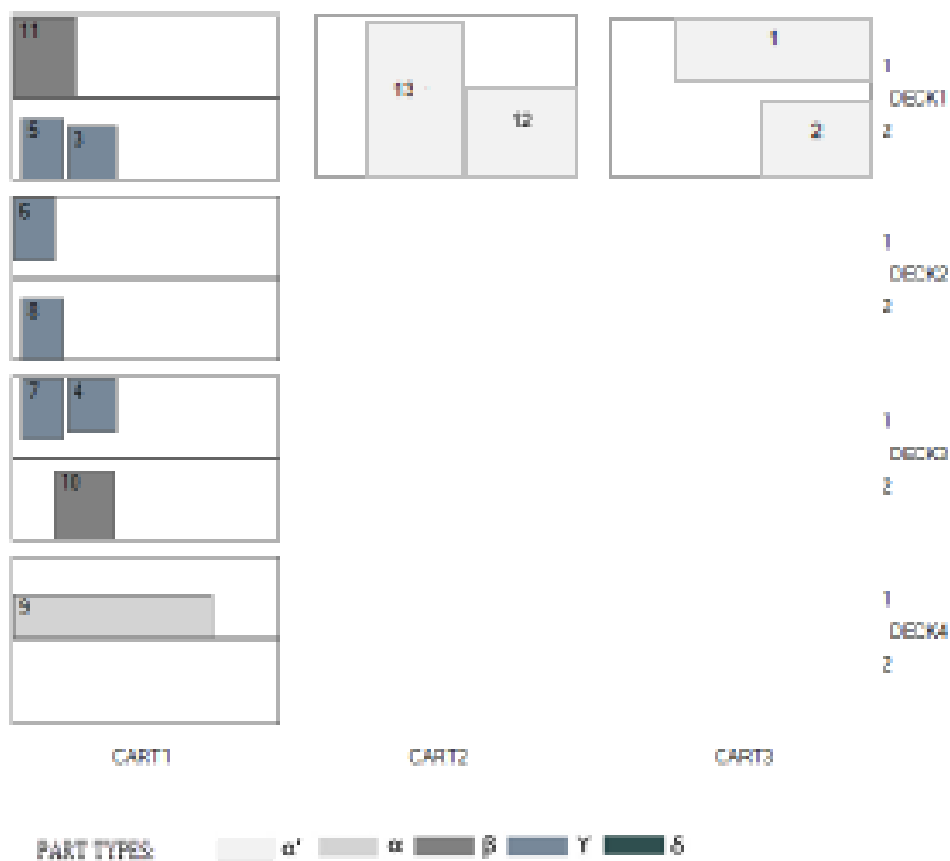


Figura 4-5: Distribución escenario 3

4.1.4 Escenario 4

Part #	Delay	Cart	Deck	Tray	Orientation	Tray	
	[min]	(c)	(d)	(t)	(β_i)	x_i	y_i
1	24.96	3	1	1	1	0	840
2	24.96	2	1	1	1	0	0
3	24.96	2	2	1	1	0	200
4	24.96	3	2	1	1	0	690
5	37.44	3	4	1	1	0	140
6	40.95	1	4	1	1	0	240
7	24.96	3	1	2	1	0	690
8	27.30	1	2	2	1	0	10
9	4.875	1	4	2	0	0	746
10	37.44	3	4	2	1	0	1340
11	4.16	3	3	2	1	0	1542
12	23.40	1	3	2	1	0	140
13	24.96	3	1	1	0	0	18
14	37.44	3	4	2	0	0	0
15	23.40	1	2	1	1	0	140
16	37.44	2	4	1	1	0	0
17	34.125	1	4	2	0	0	0
18	37.44	2	4	2	1	0	840
19	35.10	2	4	2	0	0	0
20	24.96	3	2	2	1	0	10
21	24.96	3	3	1	1	0	10
22	24.96	2	3	2	1	0	10
23	24.96	2	2	2	1	0	1100
24	24.96	2	1	2	1	0	0
25	24.96	2	3	1	1	0	0
26	23.40	1	3	1	1	0	0
27	23.40	1	1	1	1	0	452
28	58.50	1	1	2	1	0	240
29	58.50	2	2	2	1	0	0
30	24.96	3	3	2	0	0	626

Tabla 4-4: Resultados escenario 4

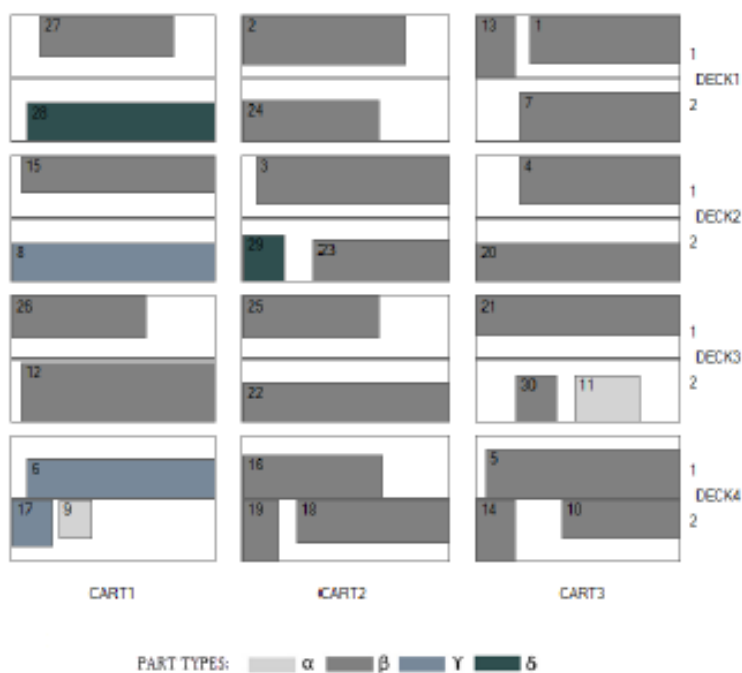


Figura 4-6: Distribución escenario 4

4.1.5 Escenario 5

Part #	Delay	Cart	Deck	Tray	Orientation	Tray	
	[min]	(c)	(d)	(t)	(β_l)	x_l	y_l
1	11.70	1	1	1	1	0	540
2	23.40	1	3	2	1	0	2040
3	5.85	1	4	2	1	0	90
4	-	-	-	-	-	-	-
5	9.10	1	1	2	0	0	756
6	9.10	1	1	2	0	0	0
7	27.30	1	3	1	1	0	1812
8	9.10	1	1	1	0	0	0
9	27.30	1	3	2	0	0	780
10	9.10	1	3	1	0	0	0
11	23.40	1	2	1	0	0	1164
12	19.50	1	2	1	0	0	0
13	19.50	1	3	2	0	0	0
14	-	-	-	-	-	-	-
15	4.88	1	4	1	1	0	0
16	27.30	1	2	2	1	0	10
17	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4-5: Resultados escenario 5

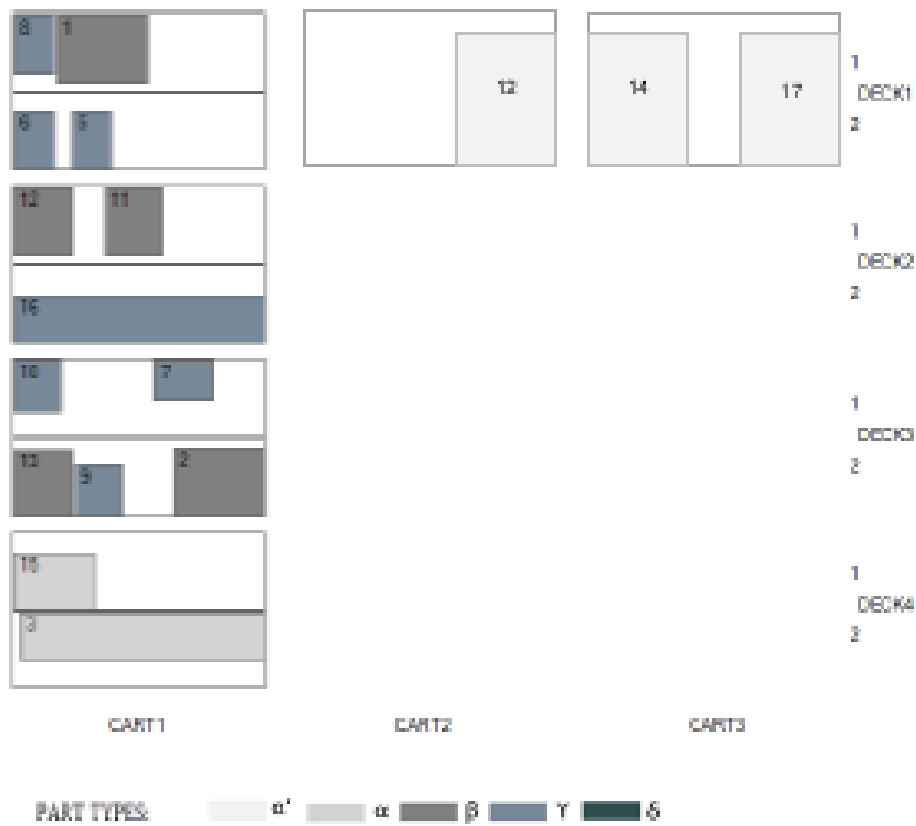


Figura 4-7: Distribución escenario 5

4.1.6 Escenario 6

Part #	Delay	Cart	Deck	Tray	Orientation	Tray	
	[min]	(c)	(d)	(t)	(β_i)	x_i	y_i
1	24.96	2	1	1	1	0	0
2	23.40	1	1	2	1	0	0
3	24.96	2	1	2	1	0	20
4	24.96	2	2	1	1	0	42
5	24.96	2	3	1	1	0	14
6	23.40	1	1	1	1	0	24
7	23.40	1	2	2	1	0	0
8	27.30	1	3	2	1	0	10
9	3.90	2	3	2	0	0	0
10	23.40	1	3	1	1	0	44
11	23.40	1	3	1	1	0	1944
12	24.96	2	2	2	1	0	14
13	23.40	1	1	2	0	0	255
14	23.40	1	2	2	0	0	255
15	27.30	1	2	1	1	0	14
16	24.96	2	3	2	1	0	55
17	24.96	2	1	1	0	0	240

Tabla 4-6: Resultados escenario 6

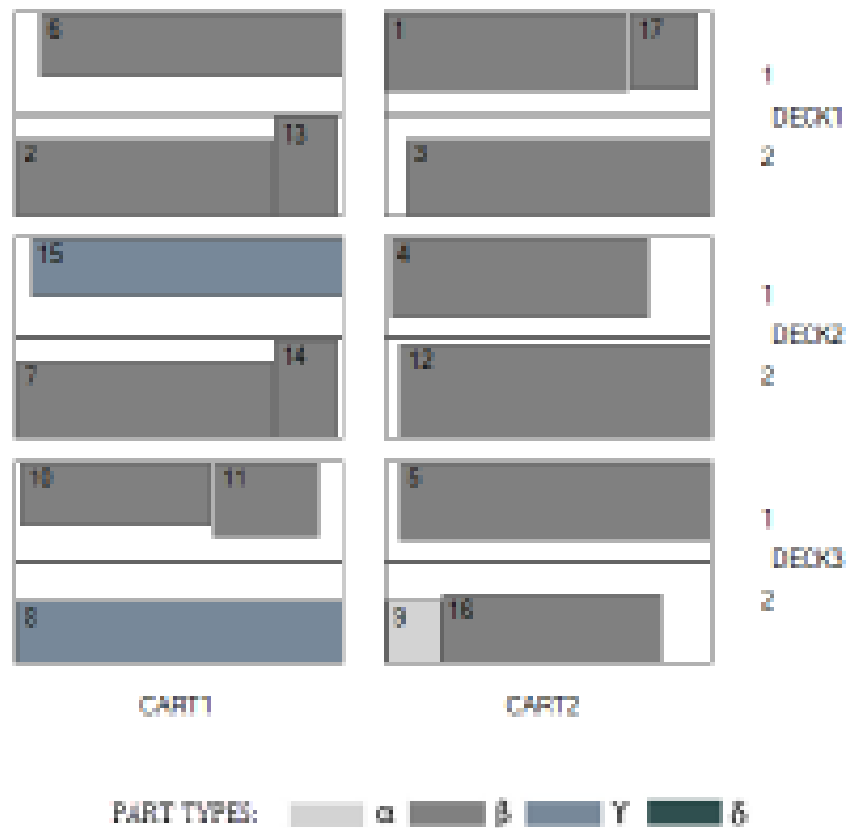


Figura 4-8: Distribución escenario 6

Los resultados muestran que el modelo MILP funciona mejor que en estudios anteriores a él. Como muestra la siguiente tabla que compara los resultados obtenidos para los escenarios reales:

Scenario	Maximum Delay by Maffezzoli and Grieco (2013)	New Maximum Delay	Improvement (%)
1	45.00 minutes	29.25 minutes	35.00
2	28.80 minutes	27.30 minutes	5.21
3	9.50 minutes	9.10 minutes	4.21

Tabla 4-7: Comparativa de resultados para los escenarios reales

Este estudio presenta dos principales ventajas. En primer lugar desde el punto de vista económico, ya que cualquier disminución en el tiempo que el autoclave está trabajando tiene su impacto económico. Al igual que en la calidad del producto ya que al minimizar el retraso máximo se evita la sobreexposición al calor de las piezas.

Este modelo es fácilmente adaptable a otras situaciones, como la inclusión de un lote de piezas más grandes. Aunque el problema ha sido resuelto de forma rápida, **en casos de mayor complejidad**, como, por ejemplo, un incremento en el área disponible dentro del autoclave, un aumento en el número de piezas o el uso de un lote de piezas de idénticas dimensiones, **el modelo disminuye su eficiencia** ya que aumenta el tiempo necesario para su resolución. **Para estos casos es necesario resolver mediante el uso de heurísticas**, hecho que fundamenta la realización de este trabajo.

4.2 Heurísticas Bin Packing

Los problemas de tipo Bin Packing (BPP) (Lodi *et al.* 2002a, Lodi *et al.* 2002b, Souza *et al.* 2011 y Wäscher *et al.* 2007) consisten en ubicar un conjunto de piezas dentro de uno o más contenedores de mayor tamaño. El objetivo de estos problemas suele ser distribuir las piezas en el menor número de contenedores posibles o, de forma alternativa, llenar éstos con el mayor número posible de piezas. Se trata de un problema de tipo NP completo, lo que implica que no es posible encontrar un algoritmo que devuelva mejores resultados que hacer una búsqueda exhaustiva de la mejor solución (Garey *et al.* 1979).

Existen heurísticas de una fase y de dos fases. Algunas de las heurísticas típicas de BPP de una sola fase son:

- **Next Fit:** Inicialmente se tienen todos los contenedores vacíos. Se empieza con el primer contenedor ($j=1$) y el primer ítem ($i=1$). Si el contenedor j tiene capacidad suficiente para albergar a la pieza i , ésta es asignada al contenedor j y se consideraría en ítem $i+1$. Si, en cambio, no tuviera la capacidad se pasaría a considerar el contenedor $j+1$. Este proceso continuaría hasta asignar los n ítems. Esta heurística nunca reconsidera los contenedores que han sido rechazados, lo que deja espacio para la mejora.
- **First Fit:** Inicialmente tomamos la pieza $i=1$ y todos los contenedores vacíos y sin utilizar ($k=0$). Se consideran todos los contenedores desde $j=1$ hasta $j=k$. Se asigna el ítem i al primer contenedor j ($j=1 \dots k$) con espacio suficiente para i . Si es imposible ubicar la pieza en los contenedores disponibles se añade un nuevo contenedor $k+1$ ($j=1 \dots k+1$). Una vez ubicada la pieza i se considera la pieza $i+1$ y se repite el proceso anterior hasta tener los n ítems asignados.
- **First Fit Decreasing:** En esta heurística de una fase se sigue el mismo procedimiento que en la heurística First Fit. La única diferencia es que las piezas se irán considerando por tamaño decreciente. Es decir, se ordenan los n ítems por tamaño tal que $s_1 \geq \dots \geq s_n$ y se aplica First Fit.

Para las heurísticas de dos fases suponemos un número ilimitado de contenedores rectangulares idénticos de

ancho W y altura H , además de un conjunto de n ítems rectangulares de ancho $w_j \leq W$ y altura h_j . El problema consiste en empaquetar sin solapamientos, todos los objetos en el número mínimo de contenedores posibles. Las piezas no pueden ser rotadas. Algunos algoritmos para estos casos tenemos:

- **Hybrid First Fit:** En la primera fase el objetivo es crear un nuevo conjunto de elementos de ancho W ; es decir, los nuevos elementos serán todos de ancho W y altura h_k . Se empieza ordenando las piezas según su altura decreciente. Para este lote de piezas se aplica First Fit Decreasing. En la segunda fase se vuelve a aplicar este algoritmo para contenedores de altura H .

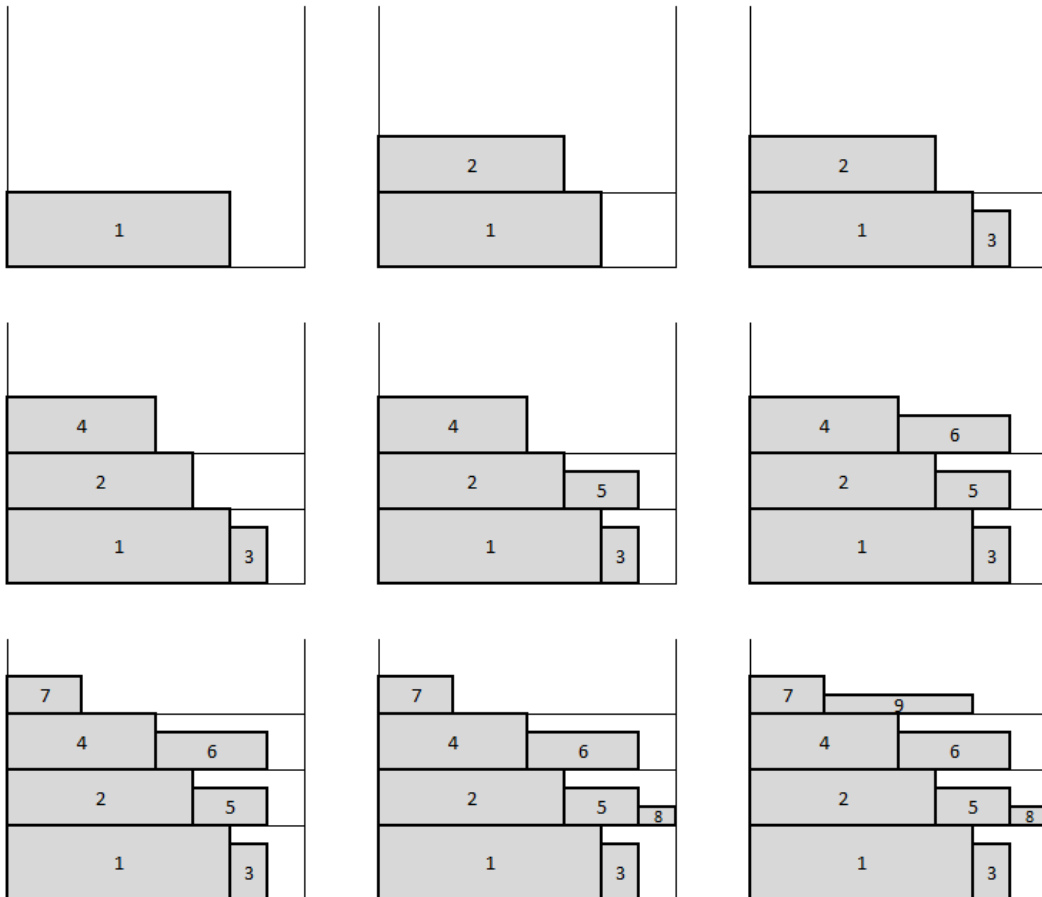


Figura 4-9: Ejemplo de distribución de piezas en la primera fase de Hybrid First Fit

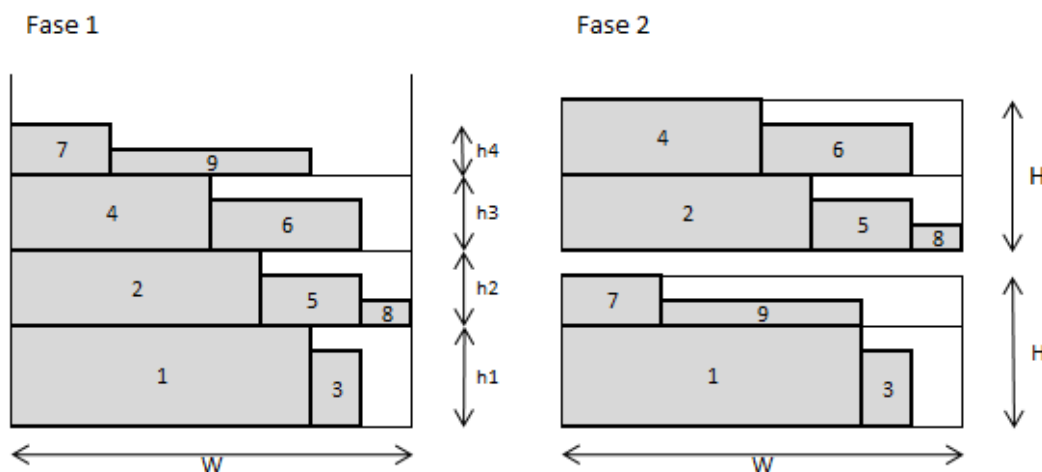


Figura 4-10: Ejemplo completo de Hybrid First Fit

- **Hybrid Next Fit:** En la primera fase también se tienen las piezas ordenadas por altura decreciente. A este conjunto se le aplica el algoritmo Next Fit explicado inicialmente, creando nuevos elementos de ancho W . A estos nuevos elementos, en la segunda fase, vuelve a aplicarse Next Fit para contenedores de altura H .

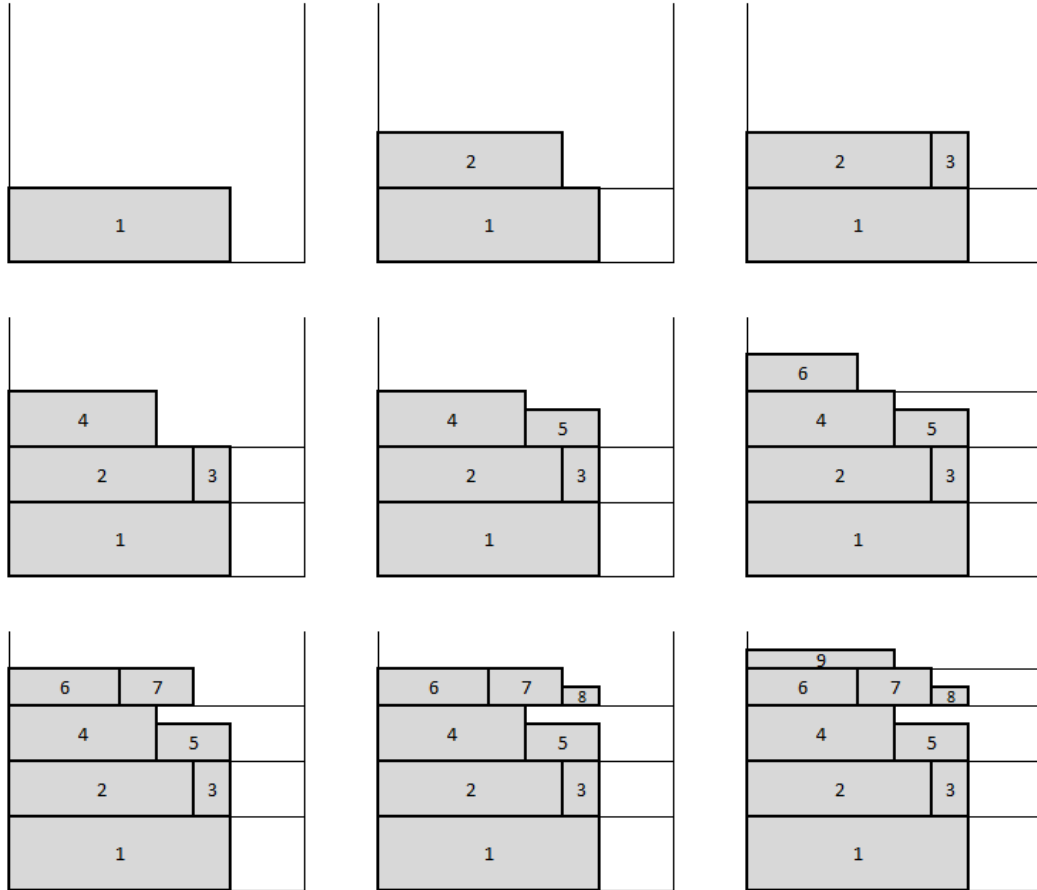


Figura 4-11: Ejemplo de distribución de piezas en la primera fase de Hybrid Next Fit

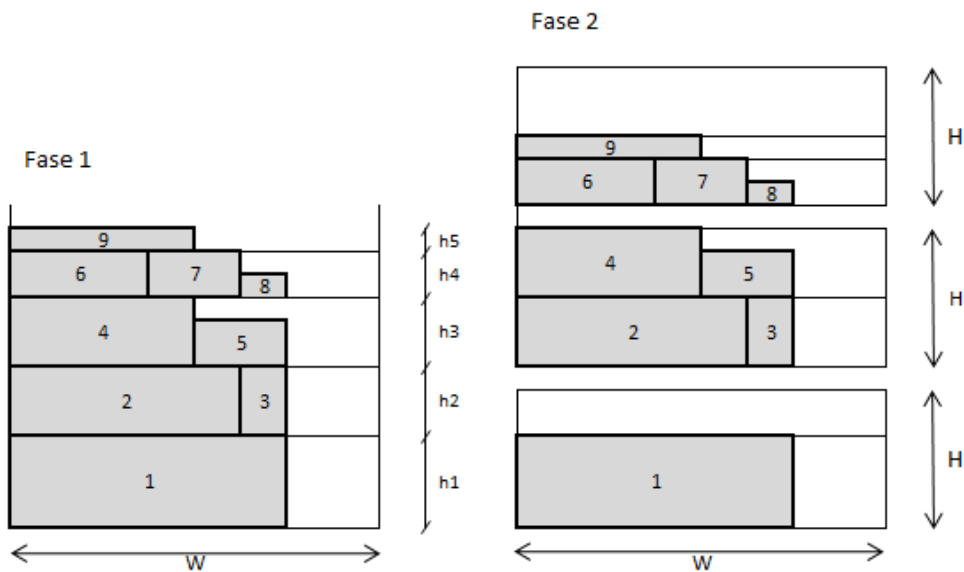


Figura 4-12: Ejemplo completo de Hybrid Next Fit

La distribución de piezas dentro de un autoclave puede asemejarse a un problema de tipo Bin Packing (BPP), donde las bandejas representan los contenedores. **Las heurísticas descritas anteriormente no son completamente válidas para nuestro problema ya que ninguna de ellas contempla la influencia de la posición de las piezas en el retraso.** Ésta es otra de las razones que justifican el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado. Podemos decir entonces, que nuestro problema es un problema de empaquetamiento con una función objetivo. Este objetivo es el de optimizar el proceso de curado de piezas en autoclave, minimizando los ciclos de curado. Por lo tanto, para la resolución del problema estudiado en este trabajo se ha diseñado una serie de heurísticas basadas en los problemas de tipo Bin Packing (BPP).

5 DISEÑO DE HEURÍSTICAS

En este capítulo se describirán las heurísticas diseñadas para el desarrollo del trabajo. Como se ha comentado anteriormente, los algoritmos BinPacking conocidos no son suficientes para solucionar nuestro problema, ya que en nuestro caso se deben tener en cuenta más aspectos aparte de la distribución propia de las piezas. Se pretende encontrar una regla que para cualquier escenario establezca una distribución de piezas tal que los tiempos de ciclo sean satisfactorios. La siguiente tabla recoge los elementos que las heurísticas BinPacking tradicionales toman en cuenta, frente a los que tienen las nuevas heurísticas diseñadas.

	<i>BPP tradicional</i>	<i>BPP adaptado</i>
Dimensiones	✓	✓
Orientación	✓	✓
Simetría	✗	✓
Tipo de pieza	✗	✓
Ubicación	✗	✓

Tabla 5-1: Comparativa de heurísticas

Por tanto, en nuestras heurísticas se tendrán también en cuenta las características de las piezas y la ubicación final de éstas que, como se ha descrito en el capítulo 3, son los elementos que determinarán el tiempo de ciclo de curado de cada pieza y en consecuencia, del lote.

El desarrollo de estos algoritmos se ha realizado con la herramienta y el lenguaje de programación Matlab (ver Marlab.R2013a). Las funciones planteadas además de resolver los seis escenarios contemplados con las distintas heurísticas, crean un archivo Excel por cada escenario donde se recogen los resultados así como una representación gráfica de la distribución de las piezas a lo largo del autoclave para cada escenario y heurística. El CD que incluye este trabajo contiene los códigos diseñados para la resolución de este trabajo.

Los factores que caracterizan estos algoritmos, y que se detallarán más adelante, son:

- Orden: tipo A y tipo B.
- Heurística: tipo HNF y tipo AUTO.
- Largo: creciente o decreciente.
- Tipo: creciente o decreciente.
- Nivel: creciente o decreciente.
- Coche: creciente o decreciente.

Estas heurísticas cuentan con dos fases bien diferenciadas. En la primera fase se realiza una reordenación de las piezas que conforman el lote; ésta se hace en función de unas condiciones determinadas. En la segunda fase se parte del nuevo conjunto de piezas reordenadas y se distribuyen a lo largo de las bandejas que conforman los distintos niveles y carros del autoclave.

5.1 Primera fase

En esta primera fase tomaremos el lote de piezas dado y reordenaremos las piezas en función de los factores *Orden*, *Largo* y *Tipo*, obteniendo así un nuevo conjunto de elementos para utilizar en la segunda fase.

Como se ha comentado anteriormente los factores pueden tomar valores distintos. A la hora de ordenar podremos hacerlo según *largo creciente* o *largo decreciente* de las piezas, tomando como largo la mayor de las dimensiones (x , y , z) de cada pieza. Igualmente, deberá ordenarse según *tipo creciente* o *tipo decreciente*.

Como se ha explicado en el apartado 3.4 los escenarios presentan distintos tipos de piezas con sus respectivas penalizaciones. Entonces, cuando se ordena por *tipo creciente* se hace en función de las penalizaciones p_i^j ; es decir, en este orden: α , β , γ y δ . Para *tipo decreciente* es, por tanto, en el orden contrario: δ , γ , β y α .

Es el factor *Orden* el que determinará la forma en la que ordenaremos. Si utilizamos el *orden tipo A* ordenaremos primero por largo (creciente o decreciente) y luego por tipo (creciente o decreciente). En cambio, si utilizamos el *orden tipo B* ordenaremos primero por tipo (creciente o decreciente) y seguidamente por largo (creciente o decreciente). Este proceso queda reflejado en la figura 6.1.

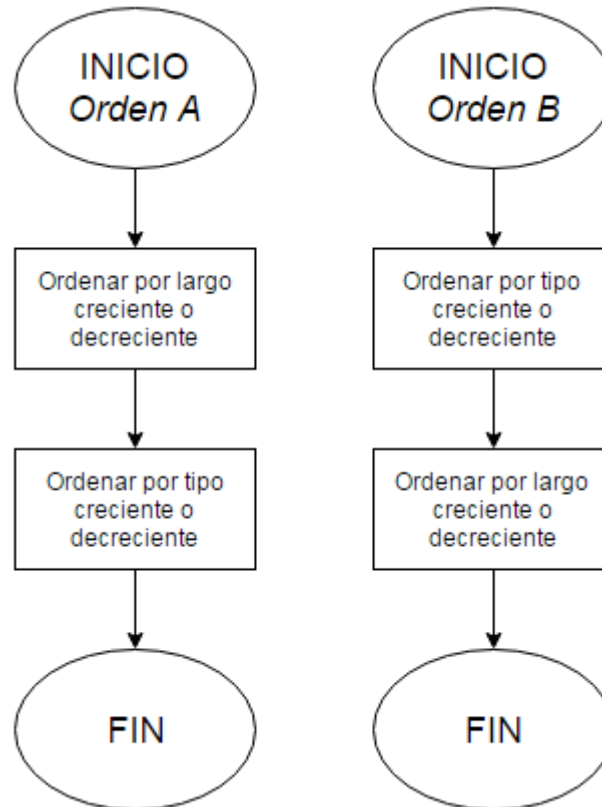


Figura 5-1: Reordenación de piezas

En este punto ya tenemos las piezas reordenadas y pasamos a aplicar a este nuevo conjunto de piezas, la heurística First Fit descrita en el capítulo 4.

En el autoclave considerado en el entorno de trabajo descrito en el capítulo 3, se dispone de 24 bandejas (3 carros, 4 niveles por carro y 2 bandejas por nivel) que representan los contenedores. Como se ha explicado en el capítulo 3, para los casos en los que el lote de piezas presente piezas de tipo α se reservan los carros 2 y 3 para este tipo de piezas, por lo que para la solución de nuestro problema consideraremos únicamente las 8 bandejas que conforman el coche 1.

Con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de las bandejas, en el momento de colocar el ítem i en la bandeja j el algoritmo comprueba si puede ser colocada en orientación vertical (largo de la pieza paralelo al eje x); sólo en el caso de que esto no sea posible se colocará la pieza en orientación horizontal (largo de la pieza paralelo al eje y). Esto se hace así para un mayor aprovechamiento del espacio.

El diagrama de flujo de este proceso queda representado en la figura 5.2.

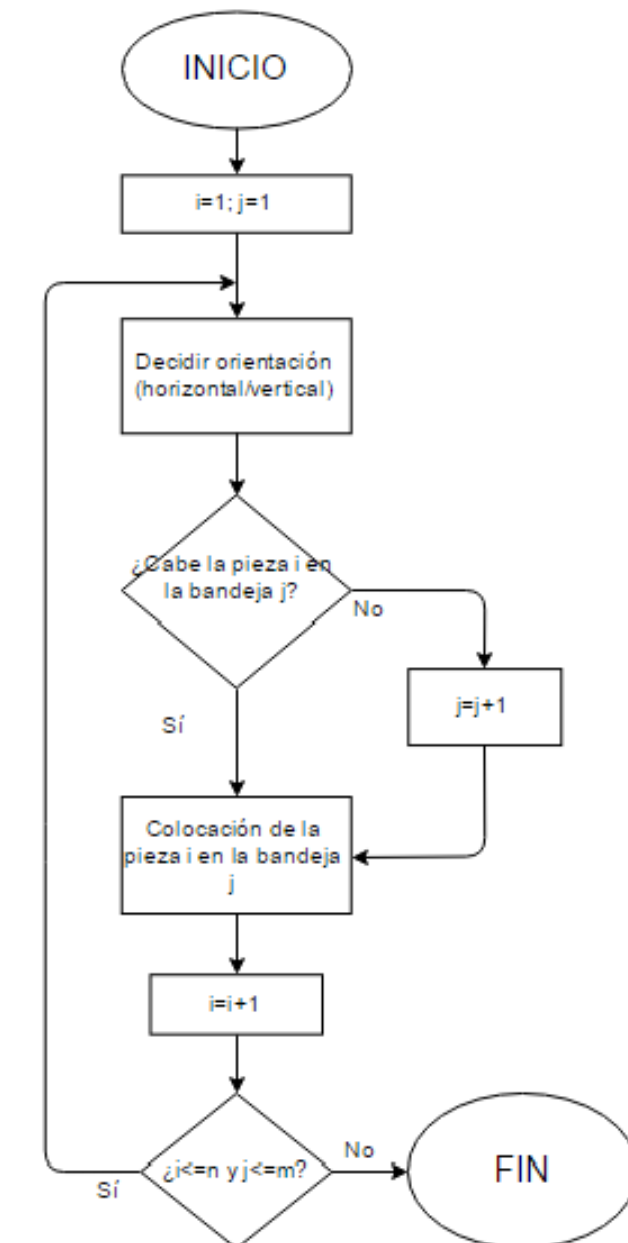


Figura 5-2: Colocación de piezas en las bandejas

5.2 Segunda fase

Una vez finalizado la primera fase contamos con el conjunto de 8 o 24 bandejas con las piezas distribuidas en ellas. En esta etapa se distribuirá este conjunto de bandejas a lo largo del autoclave. En esta segunda fase debemos diferenciar dos tipos de heurísticas: HNF y AUTO.

Nuestra función objetivo es minimizar el tiempo de ciclo de curado del lote de piezas a procesar. Este tiempo de ciclo está establecido por el retraso máximo de las piezas más los 90 minutos requeridos desde que la última pieza alcanza su temperatura de curado. Por esta razón, independientemente de la heurística utilizada, se contempla la posibilidad de girar simétricamente las bandejas. Así, a la hora de colocar una bandeja en un nivel cualquiera el algoritmo comprueba si en ese caso conviene utilizar la distribución predefinida de la bandeja o por el contrario conviene utilizar la distribución simétrica. Para los tres primeros niveles las zonas interiores de cada bandeja son las de mejores condiciones, al contrario que en el cuarto nivel que son las exteriores. La siguiente figura muestra las zonas coloreadas como las zonas de menor penalización de cada nivel.

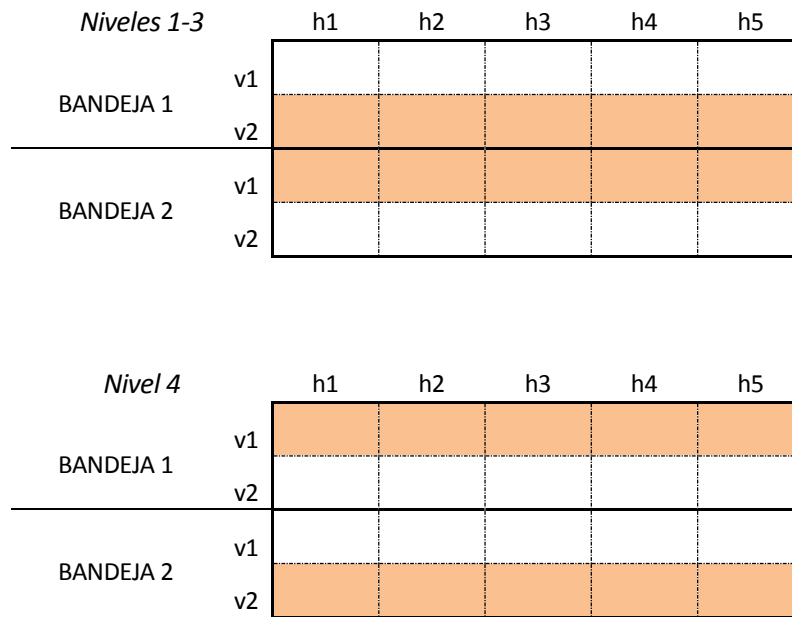


Figura 5-3: Áreas de menor penalización por niveles

5.2.1 HNF

Esta heurística está basada en el algoritmo Hybrid Next Fit explicado en el capítulo 4. En este caso serán los factores *Nivel* y *Coche* los que caracterizan esta subheurística. Como en los factores anteriores, tanto *Nivel* como *Coche* pueden tomar el valor creciente o decreciente. Para *nivel creciente* distribuiremos las bandejas del nivel 1 al nivel 4 de cada carro. Se hará en el orden contrario para *nivel decreciente*. Del mismo modo, para los escenarios que no cuentan con piezas α' , para *coche creciente* se distribuirán las bandejas del carro 1 al carro 3 y del carro 3 al carro 1 para el caso *decreciente*. Esto significa que el algoritmo recorre el conjunto de bandejas, de la primera a la última, y las va posicionando en los distintos puestos del autoclave según los valores que tomen *Nivel* y *Coche*. Por ejemplo, con *nivel decreciente* y *coche creciente* el algoritmo colocaría las bandejas 1 y 2 en el nivel 4 del coche 1, las bandeja 3 y 4 en el nivel 3 del coche 1, y así sucesivamente hasta colocar las 24 bandejas. La siguiente figura (Figura 5.4) muestra el diagrama de flujo de este proceso.

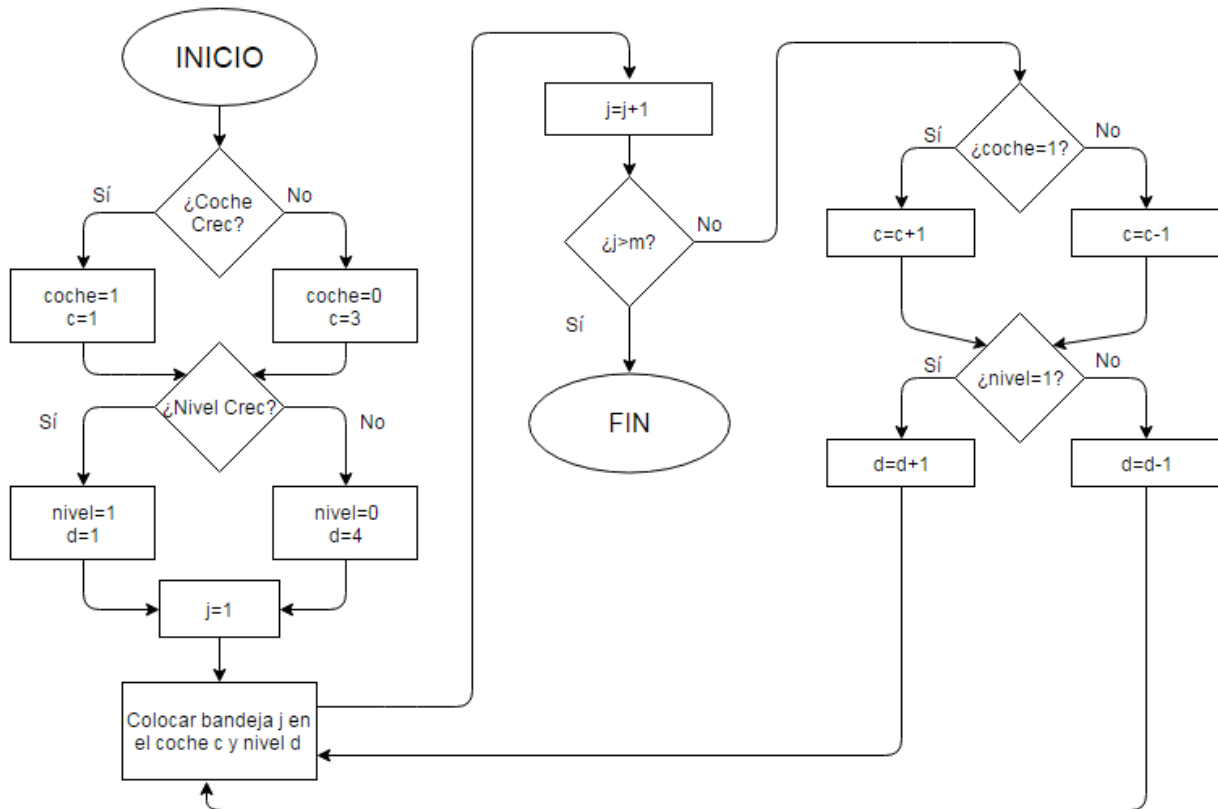


Figura 5-4: Distribución de bandejas para la heurística HNF

5.2.2 AUTO

Esta heurística se ha diseñado tras haber estudiado la tabla de penalizaciones p_{ijvh} (Tabla 3.4 y Tabla 3.5). Se puede observar que las penalizaciones según la posición de la pieza son siempre menores en cualquiera de los tres primeros niveles de cada carro que en el cuarto nivel de cada carro. A sí mismo, estas penalizaciones vuelven a ser menores cuanto menor es el carro, es decir, las penalizaciones del carro 1 son menores que en el carro 2 que a su vez son menores que las del carro 3.

Para los escenarios con piezas α este algoritmo colocará las bandejas del nivel 1 al nivel 4 del coche 1. Para el resto de escenarios, colocará en primer lugar las bandejas del nivel 1 al nivel 3 del primer al último coche y una vez hecho esto, colocará las bandejas restantes en el nivel 4 del primer al último coche nuevamente. La figura 5.5 recoge el diagrama de flujo de esta subheurística.

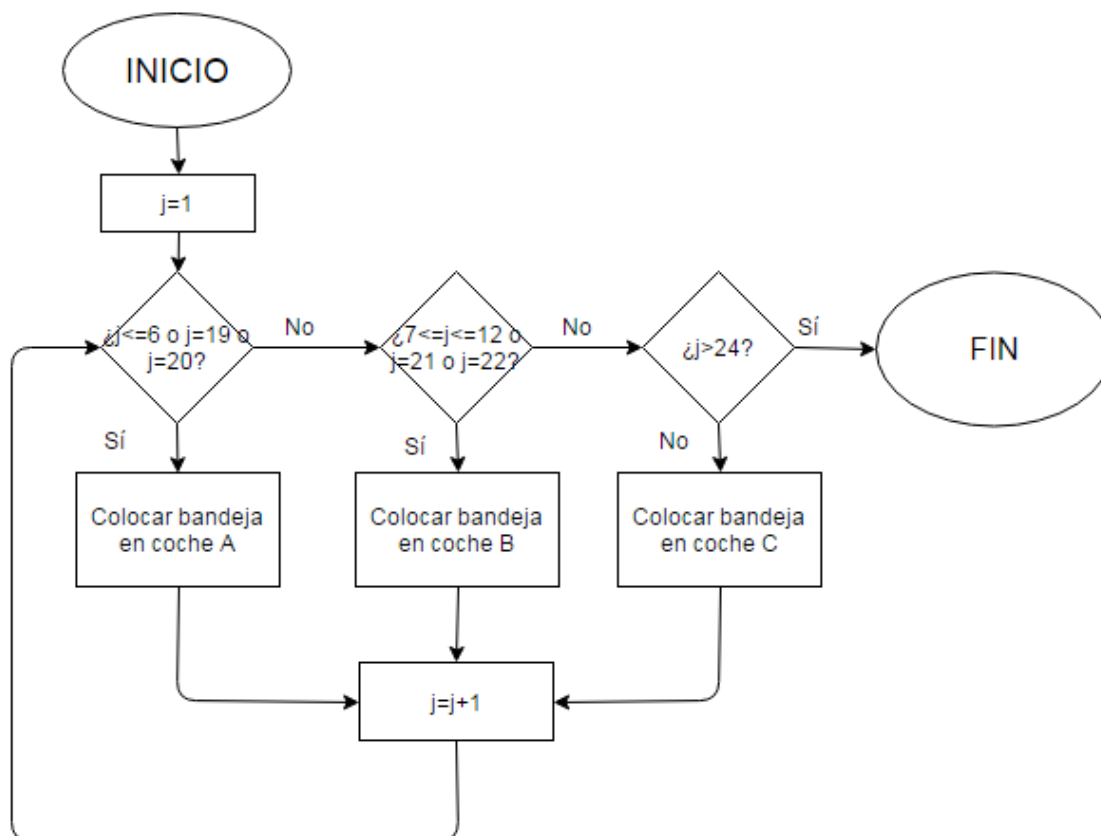


Figura 5-5: Distribución de bandejas para la heurística AUTO

6 EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo cumpliremos con otro de los objetivos específicos. Se han considerado en el entorno explicado los seis escenarios definidos en el capítulo 3, siendo tres de ellos escenarios reales y los otros tres escenarios teóricos. Ejecutaremos las heurísticas descritas en el capítulo anterior para los distintos escenarios y recogeremos los resultados obtenidos. El análisis de los resultados se hará desde diferentes puntos de vista.

6.1 Diseño experimental

Un diseño experimental nos permite obtener qué parámetros de la heurística afectan a los resultados, y en qué medida lo hacen, y cuáles no. Para esto se ha hecho uso de la herramienta DoePack (ver DoePack2000). Ésta nos ha permitido hacer para cada escenario un análisis de la varianza (ANOVA) y un análisis de las medias (ANOM). Se ha preferido mostrar los gráficos de medias marginales (MARGINAL MEANS) para obtener una visión global de cada escenario, ya que éstos muestran gráficamente y a escala la respuesta de los valores medios para cada uno de los factores.

El objetivo es definir los factores y estudiar cuáles de ellos afectan a los resultados de las heurísticas y en qué medida lo hacen. Los factores utilizados, de tipo binario (toman valor -1 o 1), han sido los siguientes:

- **A:** Tipo de orden. El valor -1 representa al orden tipo A. De esa forma el valor 1 representa al orden tipo B.
- **B:** Heurística. La heurística AUTO vendrá representado por el valor -1 y HNF por el valor 1.
- **C:** Largo de las piezas. Si toma valor -1 las piezas son ordenadas según el largo creciente. Para el valor 1 lo harán según el largo decreciente.
- **D:** Tipo de las piezas. Las piezas serán ordenadas según el valor de la penalización de las piezas: de forma creciente para -1 y decreciente para 1.
- **E:** Nivel. Para el valor -1 se recorrerán los niveles de forma creciente y para 1 al contrario, de forma decreciente.
- **F:** Coche. Indica la forma de recorrer los carros del autoclave. De forma creciente para -1 y de forma decreciente para 1.

Se ha utilizado un diseño factorial con un total de 2^6 factores ($s=6$); 64 experimentos. Por cada escenario se ha realizado un análisis detallado: ANOVA y ANOM.

Para el análisis de la varianza (ANOVA) se necesita estimar el valor de la dispersión de los datos para poder estimar así el error y comprobar si la variación en la respuesta en cada una de las heurísticas se deben al propio factor o por el contrario es un efecto tan pequeño que se confunde con el error. Al ser una heurística de tipo determinista siempre obtenemos el mismo resultado, por lo que no tenemos réplicas. Una de las técnicas que se emplean para poder estimar este error es la técnica de pooling desarrollada por Taguchi (Ranjit K.Roy, 2001).

6.1.1 Pooling

Cuando realizamos un análisis de varianza, ANOVA, lo primero que debemos hacer es identificar los factores que son significativos y los que no. Que un factor sea significativo o no lo decide el test de significación estadística. Si un factor pasa este test de significación estadística, éste es considerado significativo. Los factores que no pasan este test son considerados no significativos y normalmente se ignoran. El proceso de ignorar un factor una vez que se ha determinado no significativo se denomina *pooling*, y se realiza combinando la influencia del factor con la del

término de error.

Pooling es una práctica común de revisión y reestimación de los resultados del ANOVA. La técnica de *pooling* es altamente recomendada por dos razones. La primera, cuando un conjunto de factores son incluidos en un experimento, las leyes de la naturaleza hacen probable que la mitad de ellos sean más influyentes que el resto. La segunda razón atendiendo a predicciones estadísticas, hace que nos encontremos con dos tipos de errores: *errores tipo alfa y beta*. Un *error alfa* supone importante algo que no lo es. Por el contrario, el *error beta* ignora factores importantes. A la hora de decidir qué factores son importantes y cuáles no, debemos tratar de minimizar las posibilidades de cometer errores tipo alfa. Agrupar factores (*pooling*) que no son significativos reduce la posibilidad de cometer este tipo de error.

Un factor sufre *pooling* cuando no pasa el test de significación estadística. Lamentablemente, el test de significación estadística sólo puede hacerse cuando el término de error tiene grados de libertad (GDL) distintos de cero. En el caso de que GDL sea cero se debe empezar con el factor de menor influencia. Como regla se aplica *pooling* a un factor cuando su influencia es menor que el 10% del factor de mayor influencia. Debemos evitar aplicar *pooling* de forma arbitraria si esta condición no se cumple. Siempre que sea posible debemos aplicar el test de significación estadística para determinar a qué factor aplicar *pooling*.

- Nivel de confianza e intervalo de confianza:

El intervalo de confianza (C.I.) representa los límites en los resultados esperados y es siempre calculado en un nivel de confianza. Cuando varias muestras son testeadas para confirmar que los resultados predichos del experimento, el término *resultado esperado* expresa una media estimada de la representación promedia. El término *nivel de confianza* expresado como porcentaje indica la frecuencia con la que se espera que la representación exceda el valor estimado, para un 90% serían 9 de cada 10 veces.

- Término de error:

El término de error o factor error es más que un error experimental, representa la influencia colectiva de todos los factores no incluidos en el estudio además del error experimental. Este término combina los efectos de estas tres causas:

- Factores excluidos de un experimento por motivos de tiempo y presupuesto.
- Factores de ruido, que son los factores que influyen en los resultados pero son considerados incontrolables por motivos de costes u otras razones.
- Error experimental derivado de los factores de ruido, los instrumentos de medida y la repetibilidad.
-

- Test de significación estadística:

El término test se refiere al proceso de comparar los factores F-ratio con la tabla estándar o el valor de referencia calculado. EL objetivo de este test es simplemente distinguir los factores significativos de los no significativos. La decisión sobre si un factor es significativo o no se realiza comparando el nivel de confianza calculado con el nivel deseado de confianza, que es subjetivo y dado por el usuario. Si el nivel de confianza calculado es mayor que el nivel deseado, el factor excede las expectativas y es considerado significativo. Ese factor es importante para el análisis y no debe sufrir *pooling*.

Esta técnica en definitiva consiste en agrupar los términos que con mayor probabilidad son debidos al error. En nuestro caso se han agrupado las interacciones de más de tres factores ya que raramente se ven en la práctica. Nosotros utilizamos entonces esta hipótesis para estimar el error.

Por lo tanto se parte de la hipótesis nula (H_0), que implica que la media del efecto de todos los factores es la misma. Rechazaremos la hipótesis nula cuando H_0 es cierta. Cuando el ratio F es mucho mayor que 1 significa que el efecto de los factores comparado con el del error es significativo. Otro elemento a tener en cuenta es el factor α , nivel de significación, que es la probabilidad de tener error tipo 1, es decir, la probabilidad de que el efecto de los valores sean iguales cuando realmente son distintos. En nuestro caso el software toma por defecto $\alpha=10\%$. En el ANOVA si P-valor es menor que α se rechaza la hipótesis nula H_0 , es decir el efecto de ese factor es significativo.

6.1.2 Escenario 1

- ANOVA

Como hemos explicado los factores significativos son aquellos cuyo P-valor es menor que $\alpha=10\%$ o cuyo ratio F es mucho mayor que 1. La gráfica ANOVA obtenida mediante DoePack muestra a los factores significativos con su ratio F subrayado en amarillo y acompañados de un asterisco. Entonces, para el escenario 1 los factores significativos han resultado:

- A (Orden)
- B (Heurística)
- C (Largo)
- AB (Orden, heurística)
- AC (Orden, largo)
- BC (Heurística, largo)
- CD (Largo, tipo)
- DE (Tipo, nivel)

La contribución de estos factores es muy similar entre ellos; siendo un 8.1 % para el factor A, un 7.2 % para DE y un 6.3 % para el resto de los factores significativos.

Source	SS	DF	MS	F-ratio	t-hat	P-value	% contrib
ANOVA tables for RPD (Response Averages) - Alpha level = 0,1							
Single degree of freedom ANOVA							
Source	SS	DF	MS	F-ratio	t-hat	P-value	% contrib
A Orden (-1 v 1)	289	1	289	7,273 *	-4,25	0,010	8,1
B Heurística (-1 v 1)	225	1	225	5,662 *	3,75	0,022	6,3
C LARGO (-1 v 1)	225	1	225	5,662 *	3,75	0,022	6,3
D TIPO (-1 v 1)	1	1	1	0,02516	-0,25	0,875	0,0
E NIVEL (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
F COCHE (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AB Orden x Heurística	225	1	225	5,662 *	-3,75	0,022	6,3
AC Orden x LARGO	225	1	225	5,662 *	-3,75	0,022	6,3
AD Orden x TIPO	1	1	1	0,02516	0,25	0,875	0,0
AE Orden x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AF Orden x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BC Heurística x LARGO	225	1	225	5,662 *	-3,75	0,022	6,3
BD Heurística x TIPO	1	1	1	0,02516	0,25	0,875	0,0
BE Heurística x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BF Heurística x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
CD LARGO x TIPO	225	1	225	5,662 *	-3,75	0,022	6,3
CE LARGO x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
CF LARGO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
DE TIPO x NIVEL	256	1	256	6,442 *	4	0,015	7,2
DF TIPO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
EF NIVEL x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
Pooled	1669	42	39,74				
TOTAL	3567	63					

Figura 6-1: ANOVA Escenario 1

- ANOM y MEDIAS MARGINALES

Se puede apreciar que los mejores resultados promedios se obtienen cuando los factores principales presentan los siguientes valores:

- ORDEN: Orden tipo B (A toma valor 1).
- HEURÍSTICA: Heurística tipo AUTO (B toma valor -1).
- LARGO: Largo creciente (C toma valor -1).
- TIPO: Tipo decreciente (D toma valor 1).
- NIVEL: No influye.
- COCHE: No influye.

De esta información destacamos que, como era de esperar, la *heurística* AUTO resulta más favorable que HNF, ya que coloca las bandejas en ubicaciones de menor a mayor penalización. Esto implica que por ejemplo si hay bandejas vacías éstas quedan colocadas en los niveles de mayor penalización.

Si las piezas son ordenadas por *largo* creciente se aprovecha al máximo el área disponible en las posiciones de menor penalización. Por su parte, es coherente que los mejores resultados medios se obtengan para *tipo* decreciente, ya que así las piezas de mayor penalización quedan ubicadas, dentro de lo posible, en las posiciones de menor penalización.

También esperábamos que el factor *coche* no afectara a los resultados ya que al presentar piezas α' sólo consideramos el carro 1. El factor *nivel* tampoco influye porque al resolver con cualquiera de las heurísticas quedan ocupados los 4 niveles del coche disponible, por lo que la posición de mayor penalización siempre queda invadida.

La siguiente gráfica nos representa a escala la información anterior.

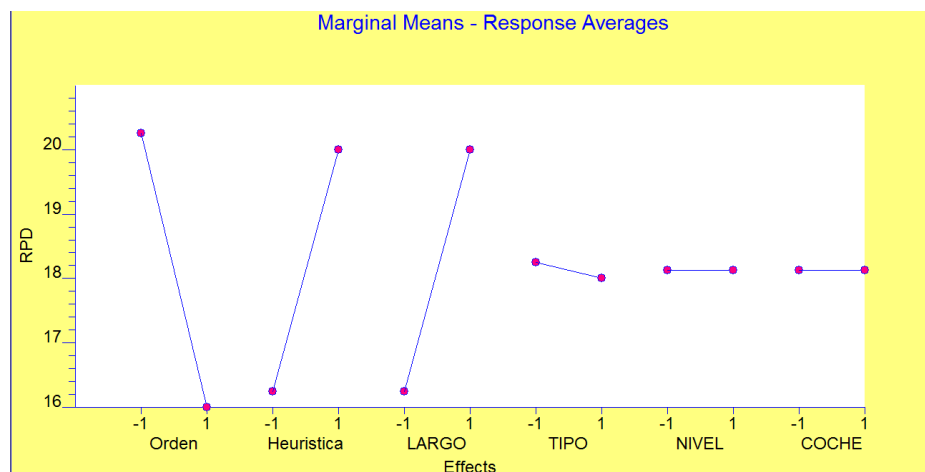


Figura 6-2: MEDIAS MARGINALES Escenario 1

6.1.3 Escenario 2

- ANOVA

Para el escenario 2 los factores significativos han resultado:

- A (Orden)
- B (Heurística)
- E (Nivel)
- AB (Orden, heurística)
- BD (Heurística, tipo)
- BE (Heurística, nivel)
- CD (Largo, tipo)

La contribución de estos factores es muy distinta entre ellos. El factor que contribuye en mayor medida es A con un 20.3 %. Con un 8.7 % contribuyen los factores AB y BD. El factor B presenta una contribución del 5.4 % y el resto de factores (E, BE y CD) contribuyen con un mismo porcentaje del 4.7 %.

Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
ANOVA tables for RPD (Response Averages) - Alpha level = 0,1							
Single degree of freedom ANOVA							
Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
A Orden (-1 v 1)	210,2	1	210,2	23,13 *	3,625	<0,001	20,3
B Heurística (-1 v 1)	56,25	1	56,25	6,189 *	1,875	0,017	5,4
C LARGO (-1 v 1)	9	1	9	0,9902	0,75	0,325	0,9
D TIPO (-1 v 1)	20,25	1	20,25	2,228	-1,125	0,143	2,0
E NIVEL (-1 v 1)	49	1	49	5,391 *	1,75	0,025	4,7
F COCHE (-1 v 1)	1	1	1	0,11	0,25	0,742	0,1
AB Orden x Heurística	90,25	1	90,25	9,929 *	-2,375	0,003	8,7
AC Orden x LARGO	4	1	4	0,4401	-0,5	0,511	0,4
AD Orden x TIPO	0,25	1	0,25	0,0275	0,125	0,869	0,0
AE Orden x NIVEL	9	1	9	0,9902	0,75	0,325	0,9
AF Orden x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BC Heurística x LARGO	9	1	9	0,9902	-0,75	0,325	0,9
BD Heurística x TIPO	90,25	1	90,25	9,929 *	2,375	0,003	8,7
BE Heurística x NIVEL	49	1	49	5,391 *	1,75	0,025	4,7
BF Heurística x COCHE	1	1	1	0,11	0,25	0,742	0,1
CD LARGO x TIPO	49	1	49	5,391 *	-1,75	0,025	4,7
CE LARGO x NIVEL	0,25	1	0,25	0,0275	0,125	0,869	0,0
CF LARGO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
DE TIPO x NIVEL	4	1	4	0,4401	0,5	0,511	0,4
DF TIPO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
EF NIVEL x COCHE	0,25	1	0,25	0,0275	0,125	0,869	0,0
Pooled	381,8	42	9,089				
TOTAL	1034	63					

Figura 6-3: ANOVA Escenario 2

• ANOM y MEDIAS MARGINALES

Los mejores resultados promedios se obtienen cuando los factores principales toman los siguientes valores:

- ORDEN: Orden tipo A (A toma valor -1).
- HEURÍSTICA: Heurística tipo AUTO (B toma valor -1).
- LARGO: Largo creciente (C toma valor -1).
- TIPO: Tipo decreciente (D toma valor 1).
- NIVEL: Nivel creciente (E toma valor -1).
- COCHE: Coche creciente (F toma valor -1).

Como hemos explicado en el escenario 1 los resultados obtenidos para los factores *heurística*, *largo* y *tipo* son los esperados. En este caso, no existen piezas α' por lo que los factores *coche* y *nivel* sí influyen.

Es coherente que *nivel* tome valor creciente ya que de esta forma las bandejas van siendo posicionadas de menor a penalización. Del mismo modo ocurre con el factor *coche* que devuelve mejores resultados cuando toma el valor creciente. Así si hubiera por ejemplo huecos libres en las bandejas caerían en las posiciones de mayor penalización.

En la siguiente figura se tiene una visión global de esta información.

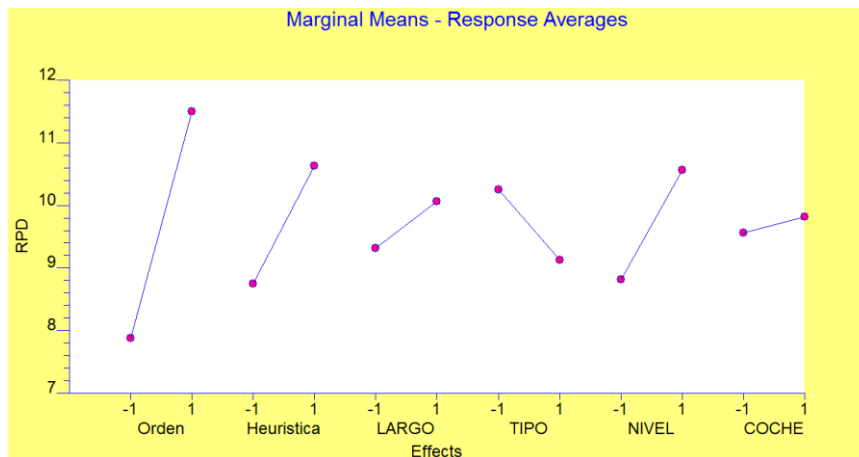


Figura 6-4: MEDIAS MARGINALES Escenario 2

6.1.4 Escenario 3

- ANOVA

Para el escenario 3 los factores significativos han resultado:

- A (Orden)
- B (Heurística)
- C (Largo)
- D (Tipo)
- E (Nivel)
- AB (Orden, heurística)
- AC (Orden, largo)
- AD (Orden, tipo)
- BC (Heurística, largo)
- BD (Heurística, tipo)
- BE (Heurística, nivel)
- CD (Largo, tipo)

La mayor contribución, de un 21.3 %, es por parte del factor B. El resto de factores contribuyen con valores similares. Los factores E y BE presentan una contribución 5.9 %; el resto de elementos contribuyen con un 4.8 %.

Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
ANOVA tables for RPD (Response Averages) - Alpha level = 0,1							
Single degree of freedom ANOVA							
Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
A Orden (-1 v 1)	81	1	81	8,4 *	2,25	0,006	4,8
B Heurística (-1 v 1)	361	1	361	37,44 *	4,75	<0,001	21,3
C LARGO (-1 v 1)	81	1	81	8,4 *	2,25	0,006	4,8
D TIPO (-1 v 1)	81	1	81	8,4 *	2,25	0,006	4,8
E NIVEL (-1 v 1)	100	1	100	10,37 *	2,5	0,002	5,9
F COCHE (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AB Orden x Heurística	81	1	81	8,4 *	-2,25	0,006	4,8
AC Orden x LARGO	81	1	81	8,4 *	-2,25	0,006	4,8
AD Orden x TIPO	81	1	81	8,4 *	-2,25	0,006	4,8
AE Orden x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AF Orden x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BC Heurística x LARGO	81	1	81	8,4 *	-2,25	0,006	4,8
BD Heurística x TIPO	81	1	81	8,4 *	-2,25	0,006	4,8
BE Heurística x NIVEL	100	1	100	10,37 *	2,5	0,002	5,9
BF Heurística x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
CD LARGO x TIPO	81	1	81	8,4 *	-2,25	0,006	4,8
CE LARGO x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
CF LARGO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
DE TIPO x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
DF TIPO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
EF NIVEL x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
Pooled	405	42	9,643				
TOTAL	1695	63					

Figura 6-5: ANOVA Escenario 3

- **ANOM y MEDIAS MARGINALES**

Los mejores resultados promedios se obtienen cuando los factores principales toman los siguientes valores:

- ORDEN: Orden tipo A (A toma valor -1).
- HEURÍSTICA: Heurística tipo AUTO (B toma valor -1).
- LARGO: Largo creciente (C toma valor -1).
- TIPO: Tipo decreciente (D toma valor 1).
- NIVEL: Nivel creciente (E toma valor -1).
- COCHE: No influye.

Como se ha explicado anteriormente los valores tomados por los factores *heurística*, *largo*, *tipo* y *nivel* son los esperados. En este escenario volvemos a tener piezas de tipo α' por lo que de nuevo es coherente que el factor *coche* no tenga ninguna influencia sobre los resultados.

La figura a continuación muestra de nuevo una visión global y a escala de los resultados anteriores.

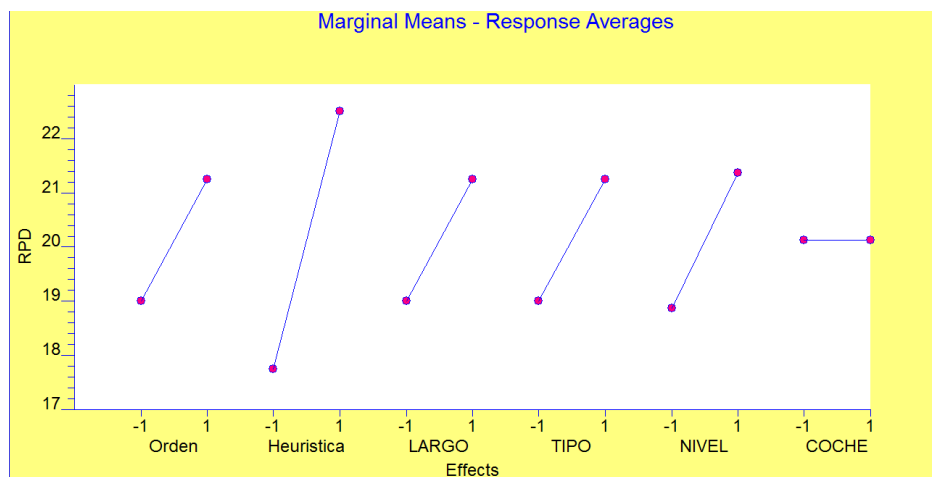


Figura 6-6: MEDIAS MARGINALES Escenario 3

6.1.5 Escenario 4

Este escenario tiene la particularidad de que sólo es admisible con el orden tipo B, es decir, cuando ordenamos por largo y luego por tipo. Para no estropear el diseño del DoePack se ha entendido el orden A como el orden B.

- **ANOVA**

Para el escenario 4 los factores significativos han resultado:

- B (Heurística)
- C (Largo)
- BC (Heurística, largo)
- CD (Largo, tipo)
- CE (Largo, nivel)
- CF (Largo, coche)
- DE (Tipo, nivel)
- DF (Tipo, coche)
- EF (Nivel, coche)

Las contribuciones de estos factores son especialmente diferentes. Con un 33.3 % de contribución están los factores C y BC, seguidos por B con un 20.5 %. El resto de factores presentan una contribución mucho menor. Con un 1.5 % están los factores CE, CF y EF. Por último con una contribución casi nula del 0.5 % tenemos los factores CD, DE y DF.

Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
ANOVA tables for RPD (Response Averages) - Alpha level = 0,1							
Single degree of freedom ANOVA							
Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
A Orden (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
B Heurística (-1 v 1)	1089	1	1089	124,3 *	8,25	<0,001	20,5
C LARGO (-1 v 1)	1764	1	1764	201,3 *	10,5	<0,001	33,3
D TIPO (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
E NIVEL (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
F COCHE (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AB Orden x Heurística	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AC Orden x LARGO	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AD Orden x TIPO	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AE Orden x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AF Orden x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BC Heurística x LARGO	1764	1	1764	201,3 *	-10,5	<0,001	33,3
BD Heurística x TIPO	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BE Heurística x NIVEL	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BF Heurística x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
CD LARGO x TIPO	25	1	25	2,853 *	1,25	0,099	0,5
CE LARGO x NIVEL	81	1	81	9,245 *	2,25	0,004	1,5
CF LARGO x COCHE	81	1	81	9,245 *	-2,25	0,004	1,5
DE TIPO x NIVEL	25	1	25	2,853 *	-1,25	0,099	0,5
DF TIPO x COCHE	25	1	25	2,853 *	1,25	0,099	0,5
EF NIVEL x COCHE	81	1	81	9,245 *	2,25	0,004	1,5
Pooled	368	42	8,762				
TOTAL	5303	63					

Figura 6-7: ANOVA Escenario 4

• ANOM y MEDIAS MARGINALES

Los mejores resultados promedios se obtienen cuando los factores principales toman los siguientes valores:

- ORDEN: No influye, porque sólo consideramos orden B.
- HEURÍSTICA: Heurística tipo AUTO (B toma valor -1).
- LARGO: Largo creciente (C toma valor -1).
- TIPO: No influye.
- NIVEL: No influye.
- COCHE: No influye.

Como ya se ha indicado este escenario es especial. Aunque el resultado obtenido nos indique que el factor *orden* no influye es realmente el factor de mayor influencia en este escenario ya que únicamente con orden tipo B obtenemos soluciones admisibles.

Los factores *heurística* y *largo* toman los valores esperados. En este caso nos llama la atención que el resto de factores *tipo*, *nivel* y *coche* no tengan influencia sobre los resultados.

La siguiente gráfica muestra nuevamente una visión global y a escala de los resultados anteriormente expuestos.

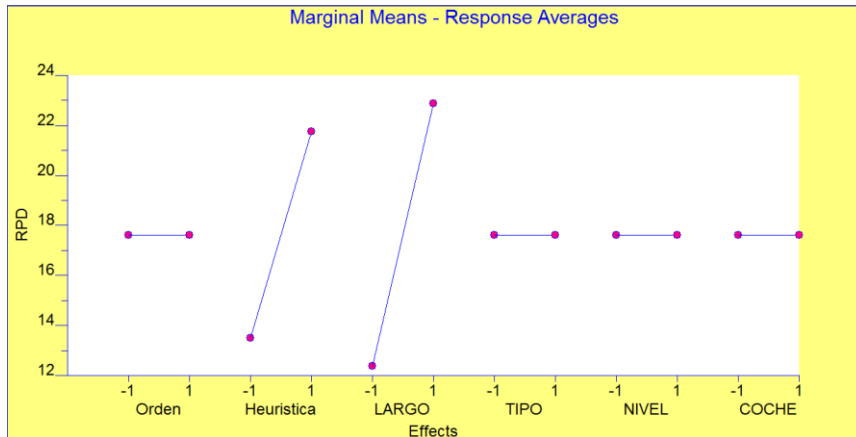


Figura 6-8: MEDIAS MARGINALES Escenario 4

6.1.6 Escenario 5

- ANOVA

Para el escenario 5 los factores significativos han resultado:

- A (Orden)
- B (Heurística)
- D (Tipo)
- E (Nivel)
- AB (Orden, heurística)
- AD (Orden, tipo)
- AE (Orden, nivel)
- BD (Heurística, tipo)
- BE (Heurística, nivel)
- DE (Tipo, nivel)

De nuevo, las contribuciones de estos factores son muy diferentes. Con una contribución del 26.8% tenemos los factores B, E y BE. El resto de factores presentan una contribución del 1.4%.

Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
ANOVA tables for RPD (Response Averages) - Alpha level = 0,1							
Single degree of freedom ANOVA							
Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
A Orden (-1 v 1)	14,06	1	14,06	6,75 *	0,9375	0,013	1,4
B Heurística (-1 v 1)	264,1	1	264,1	126,8 *	4,062	<0,001	26,8
C LARGO (-1 v 1)	1,562	1	1,562	0,75	0,3125	0,391	0,2
D TIPO (-1 v 1)	14,06	1	14,06	6,75 *	0,9375	0,013	1,4
E NIVEL (-1 v 1)	264,1	1	264,1	126,8 *	4,062	<0,001	26,8
F COCHE (-1 v 1)	0	1	0	0	0	1,000	0,0
AB Orden x Heurística	14,06	1	14,06	6,75 *	0,9375	0,013	1,4
AC Orden x LARGO	1,562	1	1,562	0,75	-0,3125	0,391	0,2
AD Orden x TIPO	14,06	1	14,06	6,75 *	-0,9375	0,013	1,4
AE Orden x NIVEL	14,06	1	14,06	6,75 *	0,9375	0,013	1,4
AF Orden x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
BC Heurística x LARGO	1,562	1	1,562	0,75	0,3125	0,391	0,2
BD Heurística x TIPO	14,06	1	14,06	6,75 *	0,9375	0,013	1,4
BE Heurística x NIVEL	264,1	1	264,1	126,8 *	4,062	<0,001	26,8
BF Heurística x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
CD LARGO x TIPO	1,562	1	1,562	0,75	-0,3125	0,391	0,2
CE LARGO x NIVEL	1,562	1	1,562	0,75	0,3125	0,391	0,2
CF LARGO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
DE TIPO x NIVEL	14,06	1	14,06	6,75 *	0,9375	0,013	1,4
DF TIPO x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
EF NIVEL x COCHE	0	1	0	0	0	1,000	0,0
Pooled	87,5	42	2,083				
TOTAL	985,9	63					

Figura 6-9: ANOVA Escenario 5

- **ANOM y MEDIAS MARGINALES**

Los mejores resultados promedios se obtienen cuando los factores principales toman los siguientes valores:

- ORDEN: Orden tipo A (A toma valor -1).
- HEURÍSTICA: Heurística tipo AUTO (B toma valor -1).
- LARGO: Largo creciente (C toma valor -1).
- TIPO: Tipo creciente (D toma valor -1).
- NIVEL: Nivel creciente (E toma valor -1).
- COCHE: No influye.

Como ya se ha explicado los valores tomados por los factores *heurística*, *largo*, *coche* y *nivel* son los esperados. En este escenario volvemos a tener piezas de tipo α' por lo que de nuevo es coherente que el factor *coche* no tenga ninguna influencia sobre los resultados. En este caso llama la atención que los mejores resultados medios se obtienen cuando *tipo* toma valor creciente, al contrario de lo esperado.

La siguiente figura presenta una visión global y a escala de los resultados comentados.

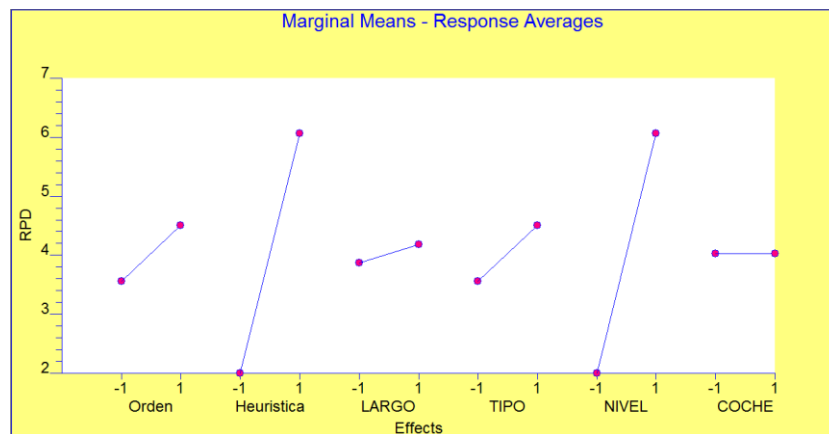


Figura 6-10: MEDIAS MARGINALES Escenario 5

6.1.7 Escenario 6

- **ANOVA**

Para el escenario 2 los factores significativos han resultado:

- B (Heurística)
- E (Nivel)
- F (Coche)
- BC (Heurística, largo)
- BD (Heurística, tipo)
- BE (Heurística, nivel)
- BF (Heurística, coche)
- DE (Tipo, nivel)

La mayor contribución de estos factores es un 83.8 % correspondiente al factor B. El resto de factores presentan contribuciones mucho menores. Los factores E y BE contribuyen con un 3.4 % cada uno. Con un 2.1 %, un 0.8 % y un 0.6 % contribuyen los factores BD, DE y BC respectivamente. Por último, la contribución de los factores F y BD es de un 0.5 %.

Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
ANOVA tables for RPD (Response Averages) - Alpha level = 0,1							
Single degree of freedom ANOVA							
Source	SS	DF	MS	F-ratio	I-hat	P-value	% contrib
A Orden (-1 v 1)	2,25	1	2,25	1,813	0,375	0,185	0,2
B Heurística (-1 v 1)	1225	1	1225	987,1 *	8,75	<0,001	83,8
C LARGO (-1 v 1)	1	1	1	0,8058	-0,25	0,374	0,1
D TIPO (-1 v 1)	2,25	1	2,25	1,813	0,375	0,185	0,2
E NIVEL (-1 v 1)	49	1	49	39,48 *	1,75	<0,001	3,4
F COCHE (-1 v 1)	7,562	1	7,562	6,094 *	0,6875	0,018	0,5
AB Orden x Heurística	2,25	1	2,25	1,813	0,375	0,185	0,2
AC Orden x LARGO	2,25	1	2,25	1,813	-0,375	0,185	0,2
AD Orden x TIPO	1	1	1	0,8058	0,25	0,374	0,1
AE Orden x NIVEL	2,25	1	2,25	1,813	0,375	0,185	0,2
AF Orden x COCHE	0,0625	1	0,0625	0,05036	0,0625	0,824	0,0
BC Heurística x LARGO	9	1	9	7,252 *	0,75	0,010	0,6
BD Heurística x TIPO	30,25	1	30,25	24,37 *	1,375	<0,001	2,1
BE Heurística x NIVEL	49	1	49	39,48 *	1,75	<0,001	3,4
BF Heurística x COCHE	7,562	1	7,562	6,094 *	0,6875	0,018	0,5
CD LARGO x TIPO	2,25	1	2,25	1,813	-0,375	0,185	0,2
CE LARGO x NIVEL	1	1	1	0,8058	0,25	0,374	0,1
CF LARGO x COCHE	0,5625	1	0,5625	0,4532	0,1875	0,504	0,0
DE TIPO x NIVEL	12,25	1	12,25	9,871 *	0,875	0,003	0,8
DF TIPO x COCHE	0,5625	1	0,5625	0,4532	0,1875	0,504	0,0
EF NIVEL x COCHE	1,562	1	1,562	1,259	-0,3125	0,268	0,1
Pooled	52,12	42	1,241				
TOTAL	1461	63					

Figura 6-11: ANOVA Escenario 6

• **ANOM y MEDIAS MARGINALES**

Los mejores resultados promedios se obtienen cuando los factores principales toman los siguientes valores:

- ORDEN: Orden tipo A (A toma valor -1).
- HEURÍSTICA: Heurística tipo AUTO (B toma valor -1).
- LARGO: Largo decreciente (C toma valor 1).
- TIPO: Tipo creciente (D toma valor -1).
- NIVEL: Nivel creciente (E toma valor -1).
- COCHE: Coche creciente (F toma valor -1).

Como se ha explicado anteriormente los valores tomados por los factores *heurística*, *coche* y *nivel* son los esperados. En este escenario vuelve a llamar la atención que los factores *largo* y *tipo* tomen los valores contrarios a los esperados.

La figura a continuación muestra de nuevo una visión global y a escala de los resultados anteriores.

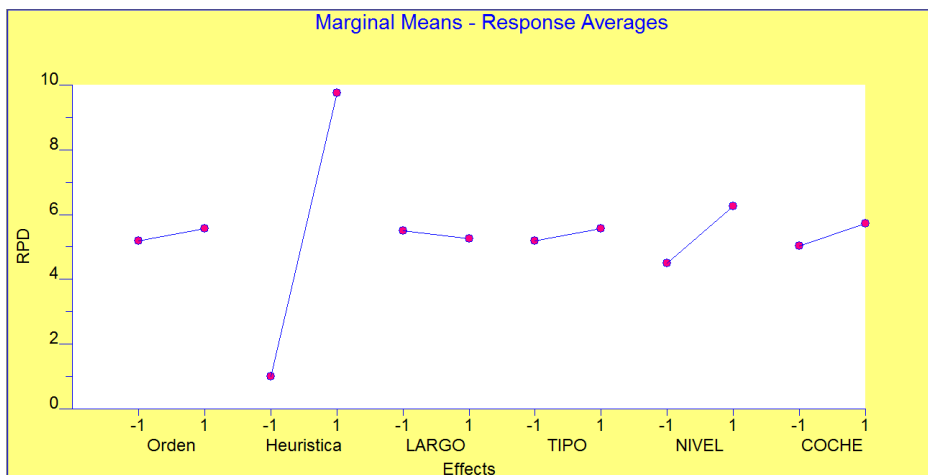


Figura 6-12: MEDIAS MARGINALES Escenario 6

6.2 Estudio de las heurísticas para todos los escenarios

Debemos señalar primero que utilizando cualquier heurística todos los escenarios estudiados son admisibles, excepto el escenario 4. Un escenario es admisible cuando el autoclave procesa todas sus piezas en un mismo lote. Analizamos ahora los resultados obtenidos en relación a las heurísticas utilizadas.

Las siguientes tablas recogen el mejor resultado alcanzado por cada heurística a modo de resumen:

<i>HNF</i>	<i>Orden A</i>	<i>Orden B</i>
LcTcNcCc	0%	12%
LcTcNcCd	2%	2%
LcTcNdCc	2%	2%
LcTcNdCd	2%	9%
LcTdNcCc	2%	9%
LcTdNcCd	2%	2%
LcTdNdCc	2%	2%
LcTdNdCd	12%	10%
LdTcNcCc	12%	12%
LdTcNcCd	2%	2%
LdTcNdCc	2%	2%
LdTcNdCd	7%	12%
LdTdNcCc	7%	12%
LdTdNcCd	2%	2%
LdTdNdCc	2%	2%
LdTdNdCd	12%	12%

<i>AUTO</i>	<i>Orden A</i>	<i>Orden B</i>
LcTc	2%	0%
LcTd	0%	2%
LdTc	2%	2%
Ldtd	0%	0%

Tabla 6-1: Mejores resultados por heurísticas

6.2.1 AUTO

Recordamos en qué consiste la heurística AUTO. Esta heurística va colocando los ítems ya ordenados (orden tipo A o tipo B) de los niveles 1 al 3 del carro 1 al carro 3. Cuando ya están completos los 3 primeros niveles de los 3 carros disponibles la heurística utiliza el cuarto nivel del carro 1 al carro 3.

En las siguientes tablas se recogen los resultados obtenidos en cada escenario con cada una de las subheurísticas de AUTO. En ellas podemos apreciar que para el orden tipo A la subheurística LdTd devuelve el mejor resultado posible en todos los escenarios, con excepción del escenario 4 que ya sabemos que no es admisible para esta forma de ordenar. En cambio, para el orden de tipo B es la subheurística LcTc la que nos devuelve los mejores valores en cada escenario.

AUTO_A	Esc_1	Esc_2	Esc_3	Esc_4	Esc_5	Esc_6	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
LcTc	32%	14%	20%	24%	2%	2%	14%	2%	32%
LcTd	16%	7%	20%	0%	2%	0%	9%	0%	20%
LdTc	32%	14%	20%	-10%	2%	2%	14%	2%	32%
LdTd	16%	0%	20%	0%	2%	0%	7%	0%	20%
TOTAL							11%		

Tabla 6-2: Heurística AUTO, Orden A

AUTO_B	Esc_1	Esc_2	Esc_3	Esc_4	Esc_5	Esc_6	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
LcTc	16%	0%	20%	0%	2%	0%	6%	0%	20%
LcTd	16%	14%	20%	3%	2%	2%	9%	2%	20%
LdTc	16%	9%	20%	3%	2%	2%	8%	2%	20%
LdTd	16%	12%	20%	24%	2%	0%	12%	0%	24%
TOTAL							9%		

Tabla 6-3: Heurística AUTO, Orden B

Estas tablas también recogen los promedios de las desviaciones obtenidas tanto de forma individual por cada subheurística como de forma global. A nivel global podemos destacar que es con el orden tipo B con el que la media de las desviaciones frente al óptimo es menor, 9%.

6.2.2 HNF

Recordamos ahora en qué consiste la heurística HNF. La forma de colocar los ítems ya ordenados (orden tipo A o tipo B) va a depender de los factores *nivel* y *coche* que pueden tomar los valores creciente o decreciente. Si *nivel* es creciente se irán colocando los ítems del nivel 1 al nivel 4; si es decreciente se hará al contrario, del nivel 4 al nivel 1. Del mismo modo, si *coche* es creciente se colocarán los ítems del carro 1 al carro 3 y en orden contrario si fuera decreciente.

En las siguientes tablas se recogen los resultados obtenidos en cada escenario con cada una de las subheurísticas de HNF. Utilizando esta heurística para el orden A no se obtiene ninguna subheurística que siempre devuelva el mejor de los posibles resultados como pasaba con la heurística AUTO. Lo mismo ocurre con el uso del orden tipo B.

HFF_A	Esc_1	Esc_2	Esc_3	Esc_4	Esc_5	Esc_6	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
LcTcNcCc	32%	12%	20%	24%	2%	0%	13%	0%	32%
LcTcNcCd	32%	9%	20%	24%	2%	7%	14%	2%	32%
LcTcNdCc	16%	9%	20%	10%	2%	9%	11%	2%	20%
LcTcNdCd	16%	9%	25%	3%	2%	9%	12%	2%	25%
LcTdNcCc	16%	9%	25%	-7%	2%	7%	11%	2%	25%
LcTdNcCd	16%	9%	20%	0%	2%	7%	11%	2%	20%
LcTdNdCc	32%	9%	20%	3%	2%	9%	14%	2%	32%
LcTdNdCd	32%	12%	25%	20%	12%	12%	18%	12%	32%
LdTcNcCc	32%	14%	25%	24%	12%	14%	19%	12%	32%
LdTcNcCd	32%	9%	20%	-10%	2%	7%	14%	2%	32%
LdTcNdCc	16%	9%	20%	-12%	2%	9%	11%	2%	20%
LdTcNdCd	16%	9%	25%	-14%	7%	9%	13%	7%	25%
LdTdNcCc	16%	9%	25%	-14%	7%	9%	13%	7%	25%
LdTdNcCd	16%	9%	20%	0%	2%	7%	11%	2%	20%
LdTdNdCc	32%	9%	20%	3%	2%	9%	14%	2%	32%
LdTdNdCd	32%	12%	25%	20%	12%	12%	18%	12%	32%
TOTAL							14%		

Tabla 6-4: Heurística HNF, Orden A

HFF_B	Esc_1	Esc_2	Esc_3	Esc_4	Esc_5	Esc_6	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
LcTcNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	14%	17%	12%	25%
LcTcNcCd	16%	9%	20%	24%	2%	7%	13%	2%	24%
LcTcNdCc	16%	9%	20%	24%	2%	9%	13%	2%	24%
LcTcNdCd	16%	12%	25%	20%	12%	9%	15%	9%	25%
LcTdNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	9%	16%	9%	25%
LcTdNcCd	16%	9%	20%	24%	2%	7%	13%	2%	24%
LcTdNdCc	16%	9%	20%	24%	2%	9%	13%	2%	24%
LcTdNdCd	16%	14%	25%	10%	12%	14%	15%	10%	25%
LdTcNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	14%	17%	12%	25%
LdTcNcCd	16%	7%	20%	24%	2%	7%	12%	2%	24%
LdTcNdCc	16%	9%	20%	10%	2%	9%	11%	2%	20%
LdTcNdCd	16%	14%	25%	24%	12%	12%	17%	12%	25%
LdTdNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	14%	17%	12%	25%
LdTdNcCd	16%	9%	20%	24%	2%	7%	13%	2%	24%
LdTdNdCc	16%	9%	20%	20%	2%	9%	12%	2%	20%
LdTdNdCd	16%	14%	25%	24%	12%	12%	17%	12%	25%
TOTAL							15%		

Tabla 6-5: Heurística HNF, Orden B

Estas tablas también recogen los promedios de las desviaciones obtenidas tanto de forma individual por cada subheurística como de forma global. A nivel global podemos destacar que en este caso es con el orden tipo A con el que la media de las desviaciones frente al óptimo es menor, 14 %.

6.3 Estudio de los resultados por escenario

Pasamos a estudiar en detalle el comportamiento de cada heurística para cada uno de los escenarios.

6.3.1 Escenario 1

El escenario 1 cuenta con piezas del tipo α' entre las 15 piezas que presenta. El óptimo conocido para este escenario es de 119.25 minutos. Los resultados obtenidos con las diferentes heurísticas para los ciclos de cura son 138 o 157.5 minutos; lo que significan un 16% o un 32% más de tiempo respecto al óptimo.

Obtenemos una desviación del 16% respecto al óptimo en cualquiera de las heurísticas y sus subheurísticas que corresponden al orden tipo B. Para el otro caso, las de orden tipo A, encontramos casos con desviación del 16% y del 32%. Para la heurística tipo AUTO obtenemos 16% de desviación para las subheurísticas LcTd y LdTd y para la heurística HNF en las subheurísticas LcTcNdCc, LcTcNdCd, LcTdNcCc, LcTdNcCd, LdTcNdCc, LdTcNdCd, LdTdNcCc, LdTdNcCd.

Orden A		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LcTd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTc	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LdTd	138	16%	11	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LcTcNcCd	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LcTcNdCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTcNdCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTdNcCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTdNcCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTdNdCc	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LcTdNdCd	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LdTcNcCc	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LdTcNcCd	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LdTcNdCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTcNdCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTdNcCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTdNcCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTdNdCc	157.5	32%	11	100%	Admisible
	LdTdNdCd	157.5	32%	11	100%	Admisible

Tabla 6-6: Escenario 1, Orden A

Orden B		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTc	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTd	138	16%	11	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTcNcCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTcNdCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTcNdCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTdNcCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTdNcCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTdNdCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LcTdNdCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTcNcCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTcNcCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTcNdCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTcNdCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTdNcCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTdNcCd	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTdNdCc	138	16%	11	100%	Admisible
	LdTdNdCd	138	16%	11	100%	Admisible

Tabla 6-7: Escenario 1, Orden B

6.3.2 Escenario 2

El escenario 2 cuenta con 26 piezas y ninguna de ellas es de tipo α' . En este caso el óptimo es de 117.3 minutos. Para este escenario se obtienen diferentes tiempos de ciclo con las diferentes heurísticas comprendidos entre los 117.3 y los 133.68 minutos. Esto significa que este escenario es capaz de alcanzar el óptimo, y lo hace concretamente con la heurística AUTO LdTd para el orden de tipo A.

Orden A		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	134	14%	26	100%	Admisible
	LcTd	125	7%	26	100%	Admisible
	LdTc	134	14%	26	100%	Admisible
	LdTd	117	0%	26	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTcNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTcNdCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTcNdCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTdNcCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTdNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTdNdCc	131	12%	26	100%	Admisible
	LcTdNdCd	134	14%	26	100%	Admisible
	LdTcNcCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTcNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTcNdCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTcNdCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTdNcCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTdNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTdNdCc	131	12%	26	100%	Admisible
	LdTdNdCd	134	14%	26	100%	Admisible

Tabla 6-8: Escenario 2, Orden A

Orden B		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	134	14%	26	100%	Admisible
	LcTd	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTc	131	12%	26	100%	Admisible
	LdTd	131	12%	26	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTcNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTcNdCc	131	12%	26	100%	Admisible
	LcTcNdCd	134	14%	26	100%	Admisible
	LcTdNcCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTdNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LcTdNdCc	134	14%	26	100%	Admisible
	LcTdNdCd	134	14%	26	100%	Admisible
	LdTcNcCc	125	7%	26	100%	Admisible
	LdTcNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTcNdCc	134	14%	26	100%	Admisible
	LdTcNdCd	134	14%	26	100%	Admisible
	LdTdNcCc	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTdNcCd	127	9%	26	100%	Admisible
	LdTdNdCc	134	14%	26	100%	Admisible
	LdTdNdCd	134	14%	26	100%	Admisible

Tabla 6-9: Escenario 2, Orden B

6.3.3 Escenario 3

El escenario 3 vuelve a contar con piezas del tipo α' entre las 13 que conforman el escenario. El óptimo para este caso es de 99.1 minutos. Los tiempos de ciclo obtenidos con las distintas heurísticas son 119.12 o 123.6 minutos; es decir un 20% o un 25% más respecto al óptimo.

En este caso observamos que esa desviación del 20% se obtiene en todos los casos en los que se utiliza la heurística AUTO independientemente del orden empleado. Para la heurística HNF tampoco influye este factor, ya que para ambas formas de ordenar, esta heurística obtiene la desviación del 20% para las subheurísticas LcTcNcCc, LcTcNcCd, LcTdNcCc, LcTdNcCd, LdTcNcCc, LdTcNcCd, LdTdNcCc, LdTdNcCd.

Orden A		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LcTd	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LdTc	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LdTd	119.1	20%	9	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LcTcNcCd	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LcTcNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LcTcNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LcTdNcCc	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LcTdNcCd	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LcTdNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LcTdNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTcNcCc	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LdTcNcCd	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LdTcNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTcNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTdNcCc	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LdTdNcCd	119.1	20%	9	100%	Admisible
	LdTdNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTdNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible

Tabla 6-10: Escenario 3, Orden A

Orden B		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LcTd	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LdTc	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LdTd	119.12	20%	9	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LcTcNcCd	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LcTcNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LcTcNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LcTdNcCc	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LcTdNcCd	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LcTdNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LcTdNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTcNcCc	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LdTcNcCd	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LdTcNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTcNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTdNcCc	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LdTdNcCd	119.12	20%	9	100%	Admisible
	LdTdNdCc	123.6	25%	9	100%	Admisible
	LdTdNdCd	123.6	25%	9	100%	Admisible

Tabla 6-11: Escenario 3, Orden B

6.3.4 Escenario 4

El escenario 4 es el más numeroso de todos con 30 piezas, ninguna de ellas de tipo α' . Como se ha comentado anteriormente este caso es especial ya que sólo utilizando el orden tipo B se consiguen soluciones admisibles, que serán las únicas que tengamos en cuenta.

El tiempo óptimo conocido es de 148.5 minutos. Este escenario con las diferentes heurísticas presenta unos tiempos de ciclo entre 152.4 y 183.6 minutos, es decir, entre un 3% y un 24% más de tiempo. Esta desviación del 3% sólo podemos alcanzarla con la heurística AUTO y las subheurísticas LcTc y LcTd.

Orden A		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	183.6	24%	29	97%	No admisible
	LcTd	148.5	0%	27	90%	No admisible
	LdTc	133.7	-10%	28	93%	No admisible
	LdTd	148.5	0%	26	87%	No admisible
HNF	LcTcNcCc	183.6	24%	29	97%	No admisible
	LcTcNcCd	163.1	10%	29	97%	No admisible
	LcTcNdCc	152.4	3%	29	97%	No admisible
	LcTcNdCd	138.8	-7%	29	97%	No admisible
	LcTdNcCc	148.5	0%	27	90%	No admisible
	LcTdNcCd	152.4	3%	27	90%	No admisible
	LcTdNdCc	177.8	20%	27	90%	No admisible
	LcTdNdCd	183.6	24%	27	90%	No admisible
	LdTcNcCc	133.7	-10%	28	93%	No admisible
	LdTcNcCd	131.0	-12%	28	93%	No admisible
	LdTcNdCc	127.4	-14%	28	93%	No admisible
	LdTcNdCd	127.4	-14%	28	93%	No admisible
	LdTdNcCc	148.5	0%	26	87%	No admisible
	LdTdNcCd	152.4	3%	26	87%	No admisible
	LdTdNdCc	177.8	20%	26	87%	No admisible
	LdTdNdCd	183.6	24%	26	87%	No admisible

Tabla 6-12: Escenario 4, Orden A

Orden B		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	152.4	3%	30	100%	Admisible
	LcTd	152.4	3%	30	100%	Admisible
	LdTc	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LdTd	183.6	24%	30	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LcTcNcCd	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LcTcNdCc	177.75	20%	30	100%	Admisible
	LcTcNdCd	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LcTdNcCc	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LcTdNcCd	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LcTdNdCc	163.125	10%	30	100%	Admisible
	LcTdNdCd	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LdTcNcCc	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LdTcNcCd	163.125	10%	30	100%	Admisible
	LdTcNdCc	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LdTcNdCd	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LdTdNcCc	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LdTdNcCd	177.75	20%	30	100%	Admisible
	LdTdNdCc	183.6	24%	30	100%	Admisible
	LdTdNdCd	183.6	24%	30	100%	Admisible

Tabla 6-13: Escenario 4, Orden B

6.3.5 Escenario 5

El escenario 5 lo forman 17 piezas y como el resto de escenarios impares cuenta con la presencia de piezas α' . El óptimo en este caso es de 117.3 minutos. Con las diferentes heurísticas obtenemos tiempos de ciclo entre 119.12 y 130.95 minutos; es decir entre un 2% y un 12% más de tiempo respecto al óptimo.

Para la heurística AUTO obtenemos ese 2% en todos los casos. Para la heurística tipo HNF y orden del tipo A, obtenemos la desviación del 2% en las subheurísticas LcTcNcCc, LcTcNcCd, LcTcNdCc, LcTcNdCd, LcTdNcCc, LcTdNcCd, LcTdNdCc, LcTdNdCd, LdTcNcCc, LdTcNcCd, LdTcNdCc, LdTcNdCd, LdTdNcCc y LdTdNcCd. En el caso de ordenar con tipo B la conseguiríamos con las subheurísticas LcTcNcCc, LcTcNcCd, LcTcNdCc, LcTcNdCd, LcTdNcCc, LcTdNcCd, LcTdNdCc, LcTdNdCd, LdTcNcCc, LdTcNcCd, LdTcNdCc, LdTcNdCd, LdTdNcCc y LdTdNcCd.

Orden A		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LcTd	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LdTc	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LdTd	119.1	2%	14	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LcTcNcCd	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LcTcNdCc	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LcTcNdCd	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LcTdNcCc	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LcTdNcCd	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LcTdNdCc	131.0	12%	14	100%	Admisible
	LcTdNdCd	131.0	12%	14	100%	Admisible
	LdTcNcCc	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LdTcNcCd	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LdTcNdCc	125.1	7%	14	100%	Admisible
	LdTcNdCd	125.1	7%	14	100%	Admisible
	LdTdNcCc	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LdTdNcCd	119.1	2%	14	100%	Admisible
	LdTdNdCc	131.0	12%	14	100%	Admisible
	LdTdNdCd	131.0	12%	14	100%	Admisible

Tabla 6-14: Escenario 5, Orden A

Orden B		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LcTd	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LdTc	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LdTd	119.12	2%	14	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LcTcNcCd	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LcTcNdCc	130.95	12%	14	100%	Admisible
	LcTcNdCd	130.95	12%	14	100%	Admisible
	LcTdNcCc	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LcTdNcCd	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LcTdNdCc	130.95	12%	14	100%	Admisible
	LcTdNdCd	130.95	12%	14	100%	Admisible
	LdTcNcCc	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LdTcNcCd	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LdTcNdCc	130.95	12%	14	100%	Admisible
	LdTcNdCd	130.95	12%	14	100%	Admisible
	LdTdNcCc	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LdTdNcCd	119.12	2%	14	100%	Admisible
	LdTdNdCc	130.95	12%	14	100%	Admisible
	LdTdNdCd	130.95	12%	14	100%	Admisible

Tabla 6-15: Escenario 5, Orden B

6.3.6 Escenario 6

El escenario 6 consta también de 17 piezas pero ninguna de tipo α' . El óptimo conocido es de 117.3 minutos. Con nuestras heurísticas obtenemos tiempos de ciclo entre los 117.3 y los 133.68 minutos. Este escenario es por tanto capaz de alcanzar el óptimo y lo hace sólo con la heurística AUTO en los siguientes casos. Para el orden de tipo A conseguimos una desviación del 0% con las subheurísticas LcTd y LdTd. Obtenemos también el óptimo para el orden tipo B con las subheurísticas LdTc y LdTd.

Orden A		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	119.1	2%	17	100%	Admisible
	LcTd	117.3	0%	17	100%	Admisible
	LdTc	119.1	2%	17	100%	Admisible
	LdTd	117.3	0%	17	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LcTcNcCd	127.4	9%	17	100%	Admisible
	LcTcNdCc	127.4	9%	17	100%	Admisible
	LcTcNdCd	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LcTdNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LcTdNcCd	127.4	9%	17	100%	Admisible
	LcTdNdCc	131.0	12%	17	100%	Admisible
	LcTdNdCd	133.7	14%	17	100%	Admisible
	LdTcNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LdTcNcCd	127.4	9%	17	100%	Admisible
	LdTcNdCc	127.4	9%	17	100%	Admisible
	LdTcNdCd	127.4	9%	17	100%	Admisible
	LdTdNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LdTdNcCd	127.4	9%	17	100%	Admisible
	LdTdNdCc	131.0	12%	17	100%	Admisible
	LdTdNdCd	133.7	14%	17	100%	Admisible

Tabla 6-16: Escenario 6, Orden A

Orden B		<i>Delay</i>	<i>Error</i>	<i>Piezas procesadas</i>	<i>% Piezas procesadas</i>	<i>Admisibilidad</i>
AUTO	LcTc	119.12	2%	17	100%	Admisible
	LcTd	119.12	2%	17	100%	Admisible
	LdTc	117.3	0%	17	100%	Admisible
	LdTd	117.3	0%	17	100%	Admisible
HNF	LcTcNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LcTcNcCd	127.44	9%	17	100%	Admisible
	LcTcNdCc	127.44	9%	17	100%	Admisible
	LcTcNdCd	127.44	9%	17	100%	Admisible
	LcTdNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LcTdNcCd	127.44	9%	17	100%	Admisible
	LcTdNdCc	133.68	14%	17	100%	Admisible
	LcTdNdCd	133.68	14%	17	100%	Admisible
	LdTcNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LdTcNcCd	127.44	9%	17	100%	Admisible
	LdTcNdCc	130.95	12%	17	100%	Admisible
	LdTcNdCd	133.68	14%	17	100%	Admisible
	LdTdNcCc	125.1	7%	17	100%	Admisible
	LdTdNcCd	127.44	9%	17	100%	Admisible
	LdTdNdCc	130.95	12%	17	100%	Admisible
	LdTdNdCd	133.68	14%	17	100%	Admisible

Tabla 6-17: Escenario 6, Orden B

7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de los diferentes análisis detallados en el capítulo anterior.

La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos para los distintos escenarios del diseño experimental mediante DoePack.

		Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5		Escenario 6	
		Significativo	Valor	Significativo	Valor	Significativo	Valor	Significativo	Valor	Significativo	Valor	Significativo	Valor
A	ORDEN	*	B	*	A	*	A	~	B	*	A	-	A
B	HEURÍSTICA	*	AUTO	*	AUTO	*	AUTO	*	AUTO	*	AUTO	*	AUTO
C	LARGO	*	CREC	-	CREC	*	CREC	-	CREC	-	CREC	-	DEC
D	TIPO	-	DEC	-	DEC	*	DEC	-	-	*	CREC	-	CREC
E	NIVEL	-	-	*	CREC	*	CREC	-	-	*	CREC	*	CREC
F	COCHE	-	-	-	CREC	-	-	-	-	-	-	*	CREC

Tabla 7-1: Resultados del diseño experimental por escenarios

Atendiendo a la información anterior nos queda claro que el factor Heurística es el más importante de todos ya que es el único factor que es significativo en todos los escenarios. Cabe resaltar también que, aunque el orden tipo A devuelve en general los mejores resultados promedios es también el tipo de orden que no consigue que todos los escenarios sean admisibles.

Asimismo, se ha podido identificar una heurística y una subheurística especialmente eficientes. Ésta es la heurística AUTO, cuando las piezas son ordenadas por tipo B (AUTO_B) y la subheurística LcTc. Haciendo uso de esta combinación no sólo todos los escenarios resultan ser admisibles, sino que además, obtenemos el mejor de los posibles resultados en cada uno de los escenarios, lo que nos permite afirmar que, aún pudiendo obtener este mejor resultado con otras heurísticas, esta combinación nos asegura encontrarlo (Tabla 7.2). Con esta combinación obtenemos desviaciones de entre un 0% y un 20%, resultados muy asumibles y satisfactorios.

		Esc_1	Esc_2	Esc_3	Esc_4	Esc_5	Esc_6
Delay mínimo		16%	0%	20%	0%	2%	0%
AUTO_A	LcTc	32%	14%	20%	24%	2%	2%
	LcTd	16%	7%	20%	0%	2%	0%
	LdTc	32%	14%	20%	-10%	2%	2%
	LdTd	16%	0%	20%	0%	2%	0%
AUTO_B	LcTc	16%	0%	20%	0%	2%	0%
	LcTd	16%	14%	20%	3%	2%	2%
	LdTc	16%	9%	20%	3%	2%	2%
	LdTd	16%	12%	20%	24%	2%	0%

Tabla 7-2: Eficiencia de las heurísticas AUTO

		Esc_1	Esc_2	Esc_3	Esc_4	Esc_5	Esc_6
Delay mínimo		16%	0%	20%	0%	2%	0%
HNF_A	LcTcNcCc	32%	12%	20%	24%	2%	0%
	LcTcNcCd	32%	9%	20%	24%	2%	7%
	LcTcNdCc	16%	9%	20%	10%	2%	9%
	LcTcNdCd	16%	9%	25%	3%	2%	9%
	LcTdNcCc	16%	9%	25%	-7%	2%	7%
	LcTdNcCd	16%	9%	20%	0%	2%	7%
	LcTdNdCc	32%	9%	20%	3%	2%	9%
	LcTdNdCd	32%	12%	25%	20%	12%	12%
	LdTcNcCc	32%	14%	25%	24%	12%	14%
	LdTcNcCd	32%	9%	20%	-10%	2%	7%
	LdTcNdCc	16%	9%	20%	-12%	2%	9%
	LdTcNdCd	16%	9%	25%	-14%	7%	9%
	LdTdNcCc	16%	9%	25%	-14%	7%	9%
	LdTdNcCd	16%	9%	20%	0%	2%	7%
	LdTdNdCc	32%	9%	20%	3%	2%	9%
	LdTdNdCd	32%	12%	25%	20%	12%	12%
HNF_B	LcTcNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	14%
	LcTcNcCd	16%	9%	20%	24%	2%	7%
	LcTcNdCc	16%	9%	20%	24%	2%	9%
	LcTcNdCd	16%	12%	25%	20%	12%	9%
	LcTdNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	9%
	LcTdNcCd	16%	9%	20%	24%	2%	7%
	LcTdNdCc	16%	9%	20%	24%	2%	9%
	LcTdNdCd	16%	14%	25%	10%	12%	14%
	LdTcNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	14%
	LdTcNcCd	16%	7%	20%	24%	2%	7%
	LdTcNdCc	16%	9%	20%	10%	2%	9%
	LdTcNdCd	16%	14%	25%	24%	12%	12%
	LdTdNcCc	16%	14%	25%	24%	12%	14%
	LdTdNcCd	16%	9%	20%	24%	2%	7%
	LdTdNdCc	16%	9%	20%	20%	2%	9%
	LdTdNdCd	16%	14%	25%	24%	12%	12%

Tabla 7-3: Eficiencia de las heurísticas HNF

La afirmación anterior cobra firmeza analizando los promedios de las heurísticas y subheurísticas del capítulo 6.2. Sabemos que la heurística AUTO_B presenta la menor desviación promedio de las distintas heurísticas, un 9%, y más concretamente en su subheurística LcTc con un 6%.

7.1 Representación de los escenarios con la heurística AUTO_B + LcTc

Las siguientes figuras recogen la distribución final para los seis escenarios estudiados tras haber aplicado la combinación de heurísticas que ha resultado más eficiente, AUTO_B + LcTc. Es decir, tras haber reordenado primero las piezas según orden tipo B, en el que se ordena primero según el tipo y después por el largo de las piezas, y después haber aplicado a este nuevo conjunto de piezas la heurística AUTO y la subheurística LcTc.

Para que al operario le resulte más sencillo trasladar la solución mostrada por pantalla al entorno real se han numerado las piezas y se ha establecido para ellas un código de colores, de forma que pueda indentificar fácilmente cada una de las piezas del lote y la posición que deben ocupar. Las piezas con numeración en color rojo son las que han resultado más restrictivas, es decir, aquellas que establecen el ciclo de curado del lote. Los diferentes tipos de pieza están representados por colores:

- Piezas α : Color verde.
- Piezas β : Color morado.
- Piezas γ : Color rosa.
- Piezas δ : Color amarillo.

A partir la representación gráfica de la distribución de las piezas de cada lote a lo largo del autoclave expuesta a continuación (Figuras 1- 6) podemos realizar el siguiente análisis. En primer lugar, como era de esperar al utilizar la heurística AUTO, siempre que quedan niveles vacíos son aquellos cuyas posiciones presentan mayores penalizaciones.

Al haber aplicado orden tipo B con largo creciente y tipo creciente, las piezas iniciales quedan reordenadas de menor a mayor largo, apareciendo, en caso de empate, primero las piezas de menor penalización. Además todas las piezas que lo permiten aparecen en orientación vertical. De esta forma se produce un mejor aprovechamiento del área disponible, ya que las posiciones de menor penalización son ocupadas por el máximo número de ellas posible.

7.1.1 Escenario 1

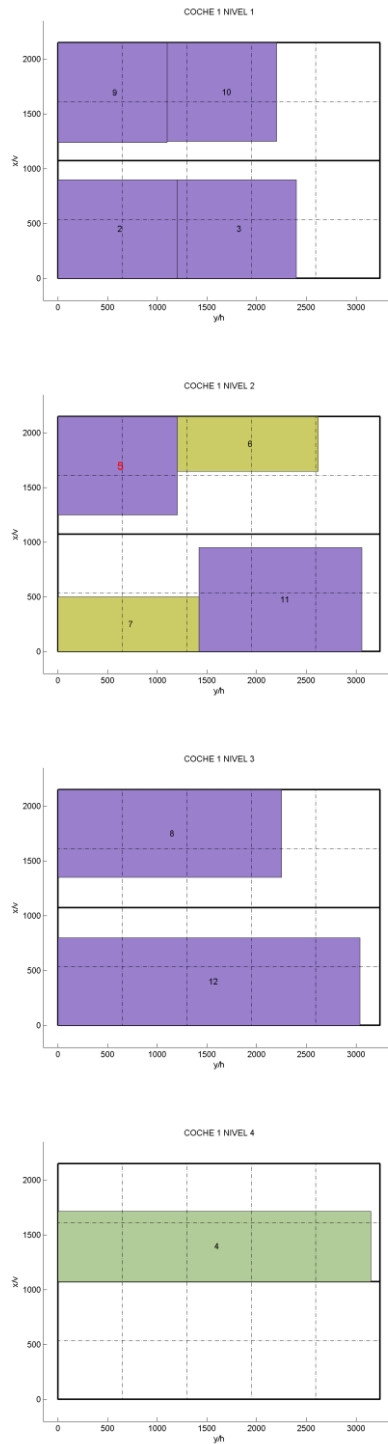


Figura 7-1: AUTO_B + LcTc Escenario 1

7.1.2 Escenario 2



Figura 7-2: AUTO_B + LcTc Escenario 2

7.1.3 Escenario 3

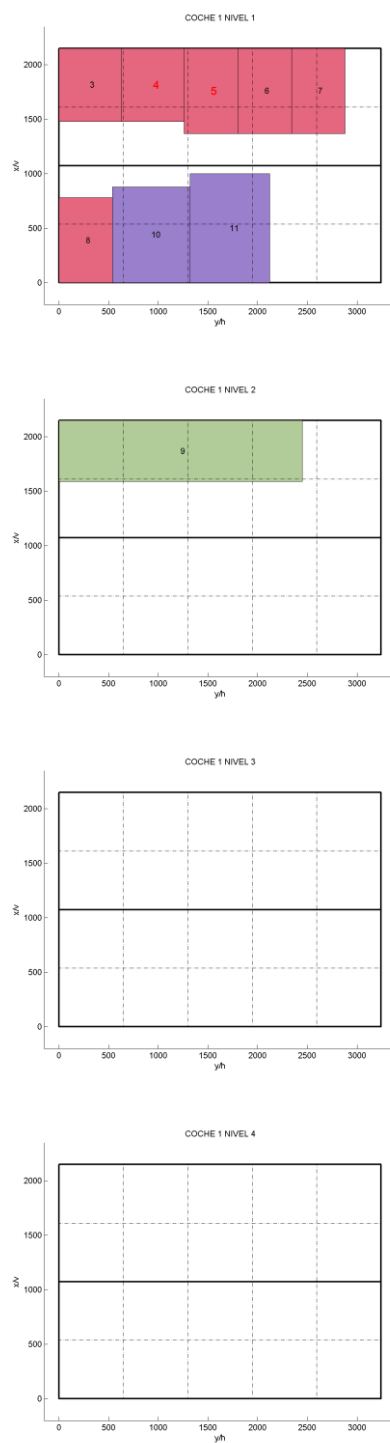


Figura 7-3: AUTO_B + LcTc Escenario 3

7.1.4 Escenario 4

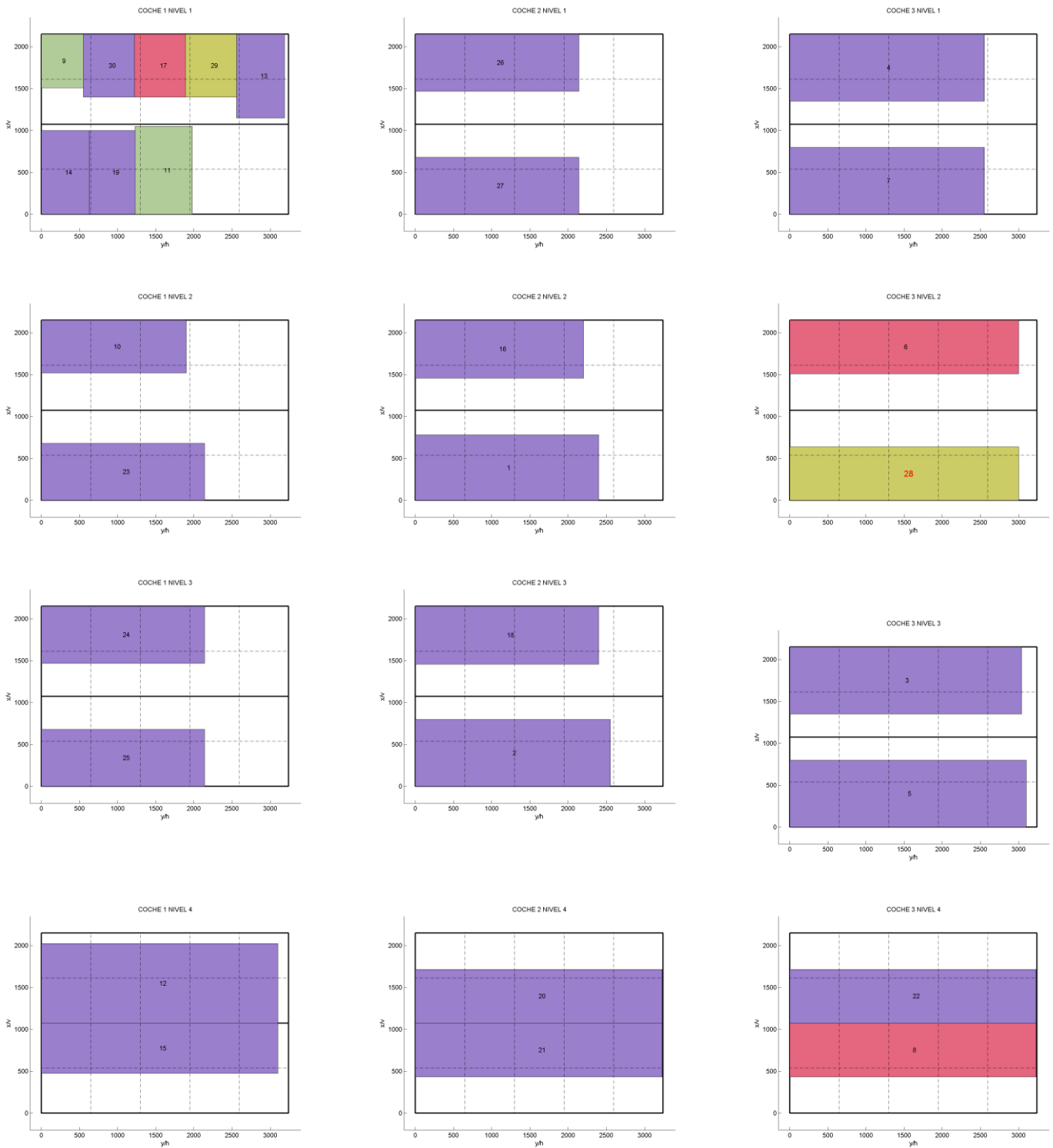


Figura 7-4: AUTO_B + LcTc Escenario 4

7.1.5 Escenario 5

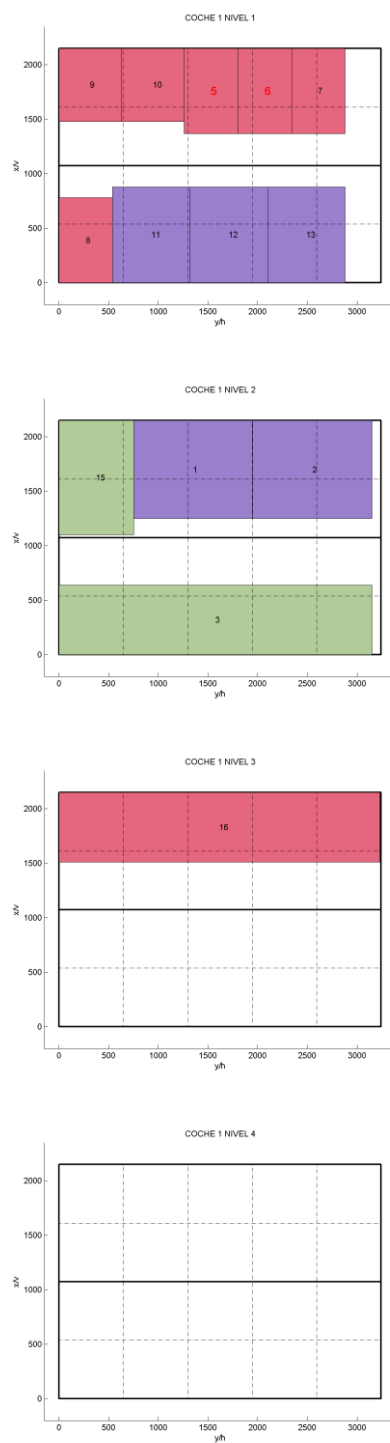


Figura 7-5: AUTO_B + LcTc Escenario 5

7.1.6 Escenario 6

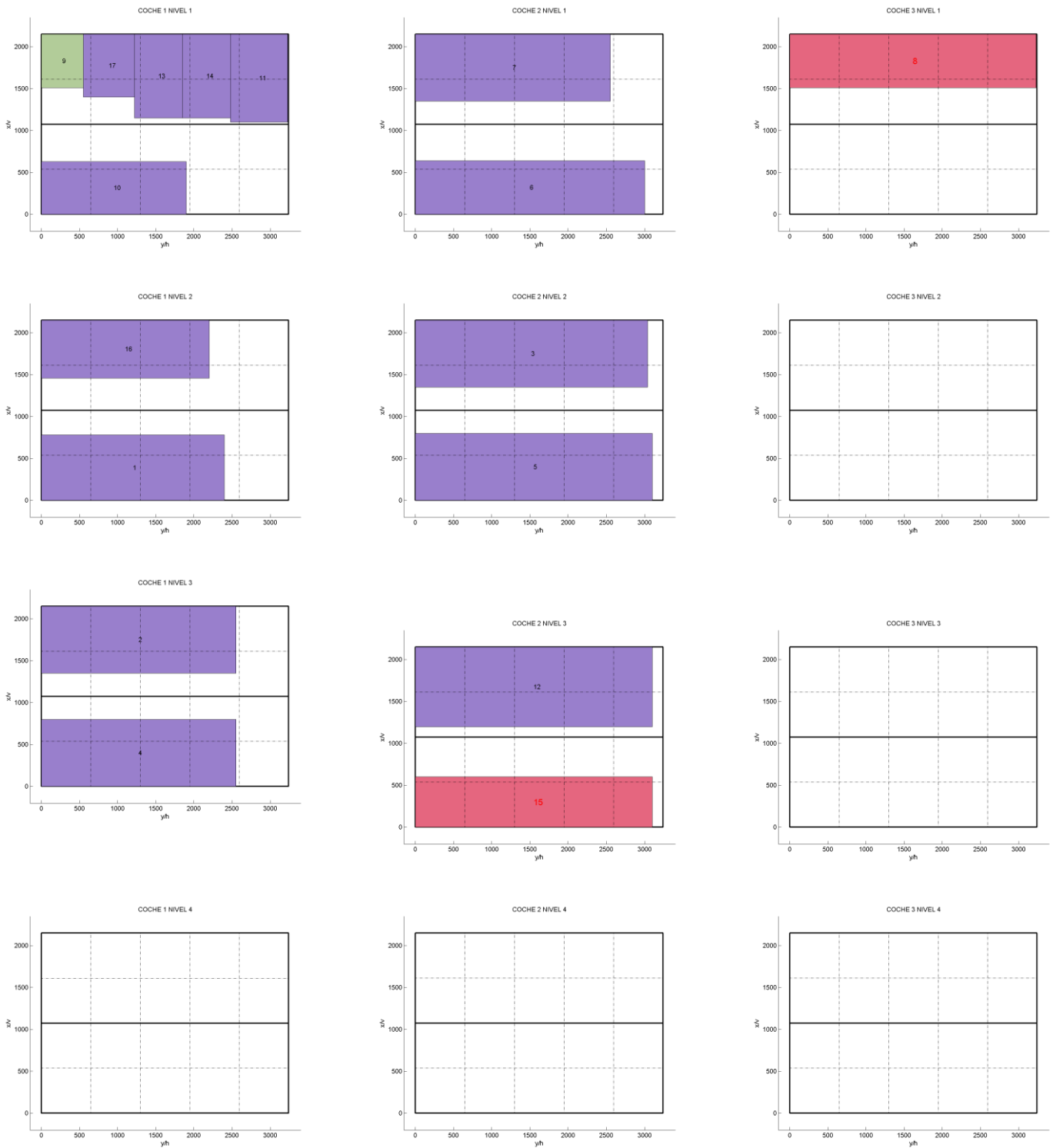


Figura 7-6: AUTO_B + LcTc Escenario 6

8 CONCLUSIONES

Finalmente en este capítulo se comentan las conclusiones a las que se han llegado tras analizar los resultados del capítulo anterior.

Como se ha demostrado a lo largo del trabajo, la fabricación de composites es un proceso muy complejo y complicado de automatizar. Esto dificulta la gestión y optimización de los subprocesos y tareas que lo conforman. El primer objetivo específico, la descripción del problema físico, ha sido abordado a lo largo del capítulo 2 cumpliendo así con éste.

Además el capítulo 3 ha estado centrado en la explicación detallada del entorno de trabajo, cómo se requería en el segundo objetivo específico. Se recogen las características y propiedades tanto del autoclave como de los lotes utilizados para la posterior experimentación.

El tercer objetivo específico marcado consistía en hacer una revisión sobre estudios, previos al nuestro, sobre la optimización del proceso de fabricación de composites. Por ello en el cuarto capítulo de este trabajo encontramos detallado resumidamente el trabajo realizado por Dios, 2015 de *Modelado y Resolución del Problema de Distribución Óptima de Piezas en un Autoclave*, así como una pequeña referencia a los problemas de Bin Packing (Lodi *et al* 2002a, Lodi *et al* 2002b, Souza *et al* 2011 y Wäscher *et al* 2007).

El capítulo 5 recoge de forma detallada las heurísticas diseñadas para la resolución del problema, que como se aprecia en el capítulo 7 han resultado ser soluciones eficientes en diferente medida, resultando la combinación de heurísticas AUTO y LcTc con orden tipo B, la más eficiente de todas. Se cumple así también con el cuarto y con el último objetivo específico propuesto, la propuesta de heurísticas y la experimentación respectivamente.

Podemos decir entonces que se ha alcanzado el objetivo general propuesto para este trabajo, habiendo cumplido con todos los objetivos específicos.

Debemos destacar el interesante uso del pooling (Ranjit K. Roy, 2001) aplicado en el capítulo 6.1 que nos ha permitido realizar un análisis experimental, aún sin contar con réplicas que nos lo permitieran.

Observando los resultados obtenidos por las distintas heurísticas llegamos a la conclusión de que, de forma general, nuestras heurísticas funcionan mejor para los escenarios teóricos así como para los escenarios en los que no existen piezas de tipo α .

Aunque los resultados obtenidos no llegan en ocasiones a ser tan buenos como los alcanzados mediante programación lineal, nuestras heurísticas presentan la ventaja de que para problemas más grandes y complejos seguiríamos obteniendo resultados admisibles en bastante menor tiempo que el que requeriría la programación lineal.

Se debe puntualizar que estas conclusiones se basan en los resultados obtenidos con las heurísticas diseñadas para la resolución de la situación descrita a lo largo de este trabajo fin de grado, es decir, para el entorno de trabajo especificado en el capítulo 2. Para otros casos podrían desarrollarse heurísticas similares que contemplaran aspectos adicionales a los ya considerados.

Este trabajo ha desarrollado una primera versión de la herramienta, que a diferencia de estudios anteriores sí tiene en cuenta el aprovechamiento de área y el calentamiento de las piezas. Una futura línea de desarrollo que se plantea consistiría mejorar la herramienta de forma que un operario pudiera ejecutar todas las heurísticas para un determinado escenario, de características conocidas, y obtuviera rápidamente la heurística que resulte en un menor RPD (Relative Percentage Deviation, Desviación Porcentual Relativa) y la distribución de piezas en el autoclave por pantalla.

BIBLIOGRAFÍA

Advani, S.G., Murat, S.E., 2010: *Process Modeling in Composites Manufacturing*. CRC Press, New York.

Dios, D., 2015: *Modelado y Resolución del problema de distribución de piezas en un autoclave*. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla.

Dios, M., González, P.L., Dios, D., Maffezzoli, A., Grieco, A., 2016: *A mathematical approach to optimize composite parts placement in autoclave*.

DoePack2000. <http://www.pqsystems.com/quality-solutions/design-of-experiments/DOEpack/>.

Garey, M.R., Johnson, D.S., 1979. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman, New York.

Lodi, A., Martello, S., Monaci, M., 2002a. Two-dimensional packing problems: A survey. *European Journal of Operational Research*.

Lodi, A., Martello, S., Vigo, D., 2002b. *Recent advances on two-dimensional bin packing problems*. *Discrete Applied Mathematics*.

Maffezzoli A., Grieco A., 2013: *Optimization of parts placement in autoclave processing of composites*. *Applied Composite Materials*.

Matlab.R2013a. <http://es.mathworks.com/products/matlab/> .

Ranjit K. Roy (2001), *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*, John Wiley & Sons.

Souza, A., *Combinatorial algorithms Lecture Notes*, Winter Term 10/11 Humboldt University Berlin.

Wäscher, G., Haubner, H., Schumann, H., 2007. *An improved typology of cutting and packing problems*. *European Journal of Operational Research*.