

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería de Organización Industrial

### Resolución de problemas de planificación de la producción en fabricación aditiva considerando 2D Nesting y múltiples orientaciones

Autor: Alejandro Rodríguez Carrero

Tutores: Ignacio Eguía Salinas

José Carlos Molina Gómez

Dpto. Organización Industrial y Gestión de  
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2024





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**Resolución de problemas de planificación de la  
producción en fabricación aditiva considerando 2D  
Nesting y múltiples orientaciones**

Autor:

Alejandro Rodríguez Carrero

Tutores:

Ignacio Eguía Salinas (Catedrático)

José Carlos Molina Gómez (Titular de Universidad)

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado: Resolución de problemas de planificación de la producción en fabricación aditiva considerando 2D Nesting y múltiples orientaciones

Autor: Alejandro Rodríguez Carrero

Tutores: Ignacio Eguía Salinas

José Carlos Molina Gómez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Sevilla, 2024



*A mi familia y amigos, por apoyarme en todo momento y confiar en mí.*

*A mis maestros, por ayudarme y enseñarme de la mejor manera sus conocimientos.*





# Agradecimientos

---

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores de este trabajo mencionados anteriormente, por su invaluable guía y apoyo a lo largo de todo el proceso de elaboración de este trabajo. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para la realización de esta investigación.

Agradecer también a las personas que han estado a mi lado durante este importante capítulo de mi vida: mi familia y amigos. Sin su apoyo incondicional, este trabajo fin de carrera no habría sido posible.

A mi familia, gracias por su amor, paciencia y por creer siempre en mí. Su dedicación y esfuerzo han sido la base sobre la cual he construido mis logros académicos. Gracias por brindarme las oportunidades necesarias para alcanzar mis sueños.

A mis amigos, gracias por estar siempre ahí para ofrecerme su apoyo y comprensión. Sus palabras de aliento y su amistad han sido fundamentales para mantenerme motivado y enfocado. Gracias por las risas, las conversaciones y por compartir conmigo este camino.



# Resumen

---

El estudio realizado se ha basado en la experimentación de instancias de problemas de fabricación aditiva para la optimización de costes, retrasos y tiempo de finalización (*makespan*) del problema de planificación de la producción basado en la asignación de piezas a estructuras, considerando la técnica 2D Bin Packing, para ser fabricadas en máquinas de impresión en 3D. El problema ha considerado la posibilidad de incorporar diferentes orientaciones en las piezas a introducir aumentando la complejidad del problema y acercándose a una situación real en la industria. Esta componente de orientaciones extra permite reducir los costes totales de producción, los retrasos de las piezas y el *makespan* sobre todo en problemas de gran complejidad.

Para la resolución de este problema, se utiliza una heurística de construcción semiparalela adaptada de la heurística de Paraskevopoulos et al. (2008) para problemas de rutas de vehículos (VRP). Estos métodos son de gran interés científico actualmente pero no han sido evaluados hasta ahora de esta manera en los problemas de fabricación aditiva permitiendo varias orientaciones a las piezas.

La comparación de resultados se ha analizado para una batería de problemas de la literatura adaptados para considerar 1, 2 y 3 orientaciones y para tres funciones objetivo (minimizar *Total Tardines*, *Min Makespan* y minimizar *Total Costs*), y se ha comprobado que la heurística desarrollada funciona bien cuando se minimiza el *Total Tardiness* y el *Total Costs*, pero no tanto cuando se minimiza el *Makespan*.

Por último, en la experimentación se ha considerado la técnica *2D Bin Packing* ofreciendo un enfoque más realista para la industria frente a cuando no se considera al considerar las dimensiones reales de cada pieza. Los experimentos son comparados en ambos casos.

# Abstract

---

The study carried out has been based on the experimentation of instances of additive manufacturing problems for the optimization of costs, delays and makespan of the production planning problem based on the assignment of parts to jobs, considering the 2D Bin Packing technique, to be manufactured on 3D printing machines. The problem has considered the possibility of incorporating different orientations in the parts to be introduced, increasing the complexity of the problem and approaching a real situation in the industry. This extra guidance component allows you to reduce total production costs, part delays and makespan, especially in highly complex problems.

To solve this problem, a semiparallel construction heuristic adapted from the heuristic of Paraskevopoulos et al. (2008) is used for vehicle routing problems (VRP). These methods are currently of great scientific interest but have not been evaluated in this way until now in additive manufacturing problems allowing various orientations of the parts.

The comparison of results has been analyzed for the problems considering 1, 2 and 3 orientations and for the three objective functions Min Total Tardines, Min Makespan and Min Total Costs, and it has been verified that the developed heuristic improves or equals all the solutions when minimizes Total Tardiness and Total Costs, but not when Makespan is minimized.

Finally, the results are compared when the 2D Bin Packing technique is considered versus when it is not considered, obtaining better results when it is not considered but the results are not realistic for the industry, as the length and width of each piece is not considered.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Notación</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Objeto del Trabajo Fin de Grado</b>	<b>11</b>
1.1. <i>Objetivos del trabajo</i>	11
1.2. <i>Estructura del trabajo</i>	12
<b>2 La Fabricación Aditiva. Programación de la producción</b>	<b>13</b>
2.1 <i>Introducción a la fabricación aditiva</i>	13
2.2 <i>Programación de la producción en Fabricación Aditiva</i>	21
2.3 <i>El problema Nesting en Fabricación Aditiva</i>	25
<b>3 Definición de la problemática</b>	<b>28</b>
3.1 <i>Problemas 2D Bin Packing para el Nesting</i>	28
3.2 <i>Problemas con múltiples orientaciones</i>	32
3.3 <i>Problemas con fechas de disponibilidad y entrega. Objetivos</i>	33
<b>4 Método de Resolución</b>	<b>38</b>
4.1 <i>Heurística de construcción semiparalela</i>	38
4.1.1 <i>Introducción</i>	38

4.1.2	Construcción de trabajos	39
4.1.3	Inicialización de trabajos	43
4.1.4	Selección del trabajo	44
4.2	<i>Algoritmo 2D Nesting</i>	46
<b>5</b>	<b>Experimentación</b>	<b>49</b>
5.1	<i>Generación de instancias</i>	49
5.2	<i>Experimentación y análisis de resultados</i>	52
5.2.1	Experimentación con 1-orientación	53
5.2.2	Experimentación con múltiples orientaciones	53
5.2.3	Experimentación por el uso del <i>2D Bin Packing</i>	56
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Futuras líneas</b>	<b>59</b>
6.1	<i>Conclusiones del estudio</i>	59
6.2	<i>Líneas futuras de investigación</i>	59
	<b>Referencias</b>	<b>60</b>
	<b>Anexos</b>	<b>64</b>
	<i>Anexo 1. Ficheros AMO de las 20 instancias con 1 orientación</i>	64

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Conjuntos e índices del modelo	34
Tabla 2. Parámetros del modelo	35
Tabla 3. Variable de decisión del modelo	35
Tabla 4. Variables auxiliares del modelo	35
Tabla 5. Instancias de Kucukkoc et al. (2021)	50
Tabla 6. Ejemplo de la generación de las 3 orientaciones de la pieza 1 de la instancia I1	51
Tabla 7. Comparación métodos Min Total Tardiness 1O	53
Tabla 8. Comparación de las 3O para minimizar Total Tardiness	54
Tabla 9. Comparación de las 3O para minimizar Makespan	55
Tabla 10. Comparación de las 3O para minimizar Total Costs	55
Tabla 11. Comparación uso 2D Bin Packing Min Total Tardiness	56
Tabla 12. Comparación uso 2D Bin Packing Min Makespan	57
Tabla 13. Comparación uso 2D Bin Packing Min Total Costs	58

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Ilustración 1. Comparación entre tecnologías convencionales (a) y las aditivas (b) (Muguruza, 2019).	14
Ilustración 2. Procesos de la Fabricación Aditiva (Gibson et al., 2021)	15
Ilustración 3. Categorías AM (Joshi & Sheikh, 2015)	16
Ilustración 4. Técnica SLM (from <a href="http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering">http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering</a> )	17
Ilustración 5. Ejemplo de trabajo o “build volume” (Fera, et al., 2018)	21
Ilustración 6. Skyline nesting (Chergui, Hadj-Hamou, & Vignat, 2018)	21
Ilustración 7. Nesting and Scheduling sub-problems. (Oh, et al., 2020)	22
Ilustración 8. Clasificación problemas “Nesting and Sheduling”. (Oh, et al., 2020)	23
Ilustración 9. Nesting types (Oh, Witherell, Lu, & Sprock, 2020)	24
Ilustración 10. Orientaciones de una pieza en los ejes X, Y, Z (Framinan, et al., 2023).	26
Ilustración 11. Algoritmos de nivel (Lodi, Martello, & Vigo, 2002)	29
Ilustración 12. Posibles orientaciones de una parte (Lodi, Martello, & Vigo, 2002)	32
Ilustración 13. Ejemplo de una pieza y un job	46
Ilustración 14. Giro de una pieza	47
Ilustración 15. Corte Guillotina horizontal del algoritmo 2D Nesting	47
Ilustración 16. Ejemplo final job	48
Ilustración 17. Diagrama de Flujo del Algoritmo 2D Nesting	48
Ilustración 18. Primera parte fichero datos de entrada (Sección inicial)	51
Ilustración 19. Segunda parte fichero datos de entrada (Volumen y fechas piezas)	51
Ilustración 20. Tercera parte fichero entrada de datos (Características piezas)	52
Ilustración 21. Cuarta parte fichero entrada de datos (Características máquinas)	52





# Notación

---

FA	Fabricación Aditiva
AM	Additive Manufacturing
1O	Una orientación
2O	Dos orientaciones
3O	Tres orientaciones
SLM	Selective Laser Melting
2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
TFG	Trabajo fin de grado
ABOs	Orientaciones de construcción alternativas
OBO	Optimal build orientation

# 1 OBJETO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

---

## 1.1. Objetivos del trabajo

El principal objetivo de este trabajo es introducir y resolver el problema de planificación de la producción en Fabricación Aditiva (FA) en entornos de máquinas heterogéneas en paralelo con orientaciones alternativas en las piezas y considerando el 2D Nesting.

El problema consiste en asignar y localizar piezas en agrupaciones o estructuras (*jobs*) para ser fabricadas haciendo uso de máquinas de FA dispuestas en paralelo. El problema incorpora atributos presentes en entornos industriales reales como son la consideración de máquinas heterogéneas, la posibilidad de disponer las piezas en diferentes orientaciones alternativas a la hora de ser fabricadas en el job o la consideración de fechas de disponibilidad y entrega de las piezas, que añaden una componente de dificultad al problema.

El problema se presenta mediante un modelo de programación lineal y es resuelto mediante un algoritmo heurístico de construcción semiparalela, adaptación al algoritmo presentado por Paraskevopoulos et al. (2008), para problemas de diseño de rutas de vehículos (*Vehicle Routing Problem, VRP*). Esta adaptación está diseñada específicamente para abordar las particularidades de la planificación en AM, mejorando la agrupación de piezas y la asignación de trabajos a las máquinas.

Para llevar a cabo este objetivo, se ha realizado el estudio de múltiples artículos científicos que analizan el problema de planificación de la producción en FA partiendo de problemas básicos hasta los más complejos.

Dichos artículos han servido de base para plantear el problema mediante un modelo matemático formulado con técnicas de programación lineal. Por otra parte, debido a la novedad del problema presentado, se ha realizado una recopilación de instancias existentes que resuelven variantes del problema en la literatura científica, con el fin de elaborar una nueva batería de problemas. Con el fin de validar el comportamiento y rendimiento del algoritmo implementado, se han comparado las soluciones obtenidas por el algoritmo con soluciones óptimas o aproximadas de la literatura científica y entre ellas mismas al no encontrar nada parecido.

El motivo por el que se ha elegido este problema es por la necesidad de avanzar en el estudio de problemas de FA identificado en múltiples artículos de la literatura. El campo de estudio está sufriendo un fuerte desarrollo en los últimos años, pero no ha culminado de aprovechar todo su potencial. La componente de multiorientación estudiada supone un aporte distintivo en la consecución de los objetivos analizados.

Los objetivos del Trabajo Fin de Grado (TFG) son los siguientes:

1. Analizar el problema que se aborda y problemas relacionados en la literatura.
2. Adecuación y generación de instancias a resolver en el estudio mediante Excel, Visual Basic para Aplicaciones (VBA) y Python.
3. Diseño y desarrollo de un algoritmo en Visual Studio mediante lenguaje C++ que resuelva el problema.
4. Análisis de datos obtenidos de la resolución de las instancias.
5. Comparación de resultados y extracción de conclusiones.

La contribución principal de este TFG es la consideración de la multiorientación de las piezas para su agrupación en *jobs* o estructuras y la elaboración de un algoritmo heurístico que resuelva el problema de planificación de la producción en Fabricación Aditiva de forma eficiente.

## 1.2. Estructura del trabajo

La estructura del Trabajo Fin de Grado está dividido en 5 grandes capítulos, las referencias y un anexo, descritos a continuación:

- Capítulo 1: La fabricación aditiva. Programación de la producción.

El primer apartado es un capítulo introductorio de descripción de la FA, programación de la producción en FA y el problema Nesting en FA. Se comenta brevemente el propósito del TFG y su interés de estudio, su aplicabilidad, objetivos, ámbito, origen tecnológico y clasificación de la tecnología. También incluye una revisión de la literatura relacionada y que se ha tomado como base del trabajo.

- Capítulo 2: Definición de la problemática.

Este capítulo describe en profundidad el problema a resolver. Se exponen sus características principales en cuanto al entorno, restricciones y objetivos, además de comentar cualquier aspecto que ayude a comprender el problema en cuestión. Incluye el modelo de programación lineal sobre el que se ha basado el algoritmo del estudio.

- Capítulo 3: Método de resolución.

El tercer capítulo describe con detalle las componentes del algoritmo heurístico desarrollado en el TFG para la resolución del problema.

- Capítulo 4: Experimentación.

Este apartado recoge una descripción detallada de los resultados computacionales obtenidos tras la ejecución del algoritmo en los casos de estudio. Se muestra el conjunto de pruebas realizadas, y se realiza la comparativa de los resultados obtenidos.

- Capítulo 5: Conclusiones.

Para finalizar, este último capítulo recoge las conclusiones extraídas tras el estudio, así como las posibles futuras líneas de investigación que se podrían plantear.

Al final del documento se encuentran las referencias bibliográficas, además de un Anexo que contiene las instancias utilizadas como referencia.

# 2 LA FABRICACIÓN ADITIVA. PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

---

La fabricación aditiva, o impresión 3D, ha causado un gran revuelo en la industria actual, irrumpiendo con muchísima fuerza en el mercado gracias a la eficiencia y precisión que ofrecen sus técnicas de fabricación. En este capítulo, se introduce la fabricación aditiva a través de descripciones e ilustraciones, y la relevancia que ha cobrado en los últimos años. Analizaremos sus ventajas y desventajas respecto a los métodos de fabricación actuales. Se explican también los problemas que se han estudiado en la literatura y los procesos de fabricación abordados. Finalmente, se exponen los diferentes tipos de problemas que se modelarán y resolverán centrándonos sobre todo en los problemas de *Nesting*.

## 2.1 Introducción a la fabricación aditiva

La fabricación aditiva (*Additive Manufacturing, AM*), también conocida como fabricación por adición o comúnmente llamada impresión en tres dimensiones ha surgido como una tecnología revolucionaria en el ámbito de la ingeniería y la producción industrial, irrumpiendo con muchísima fuerza en el mercado gracias a la eficiencia y precisión que ofrecen sus técnicas de fabricación, convirtiéndose así en uno de los pilares de la revolución industrial, que forma parte de la Industria 4.0.

Esta tecnología ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, siendo aplicada en una amplia gama de sectores industriales, desde la medicina hasta la industria aeroespacial. La versatilidad y las ventajas ofrecidas por la fabricación aditiva, como la reducción de costos, tiempos de producción más rápidos y la capacidad de crear geometrías que de otro modo serían imposibles de fabricar, la han convertido en una herramienta fundamental en el arsenal de los ingenieros y diseñadores (Tofail, et al., 2018).

A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación sustractiva, donde se eliminan materiales de un bloque sólido para obtener la forma deseada, la fabricación aditiva construye objetos capa por capa a partir de datos digitales, permitiendo la creación de componentes altamente complejos con una precisión sin precedentes (Thompson, et al., 2016).

Como podemos apreciar en la ilustración 1, hay una gran diferencia en el desperdicio que se obtiene en cada proceso productivo.

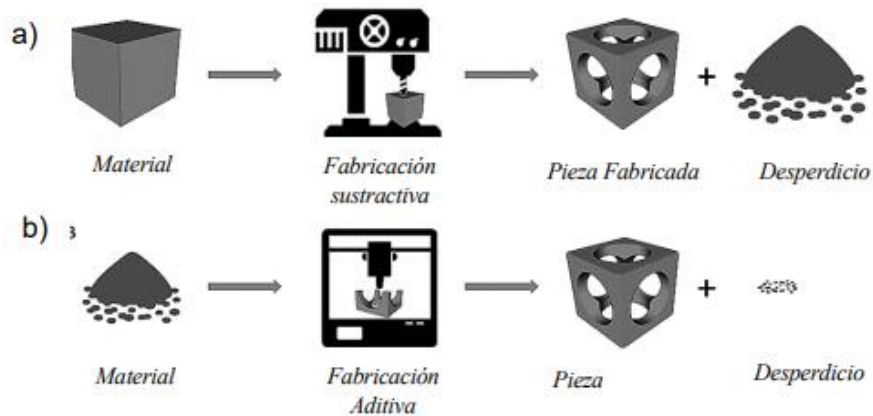


Ilustración 1. Comparación entre tecnologías convencionales (a) y las aditivas (b) (Muguruza, 2019).

Una vez se conoce el fundamento principal de la fabricación aditiva, se procede a definir, a rasgos generales, el proceso que siguen las impresoras 3D para conformar los productos (Hernández-Castellano, et al., 2019). Para comenzar, se necesita un modelo digital 3D que normalmente se obtiene con programas informáticos, como por ejemplo Autodesk® o SolidWorks®. Una de las características que hacen a dicha tecnología tan interesante es que, de manera digital, se pueden llegar a obtener geometrías muy complejas que mediante técnicas tradicionales jamás se conseguirían. Además, también cabe la posibilidad de llevar a cabo ingeniería inversa, es decir, obtener el modelo digital de una forma física mediante un escaneo 3D. A continuación, se convierte el modelo anteriormente formado en un fichero estandarizado para la lectura en la máquina. Este formato, por regla general es el “. STL”, aunque los tipos de fichero soportados por las impresoras 3D evolucionan de manera muy rápida al igual que las propias máquinas.

En el siguiente paso, mediante un programa informático denominado “slicer” se prepara el fichero “. STL” para el procesamiento en la impresora 3D. En dicho procedimiento se establecen valores para los distintos parámetros de fabricación, como, por ejemplo, la temperatura de conformado, la adición de material de soporte si fuera necesario, las capas de material o la orientación de la pieza. Finalmente, una vez preparado el archivo para su procesamiento con todos sus valores ajustados e información necesaria, se introduce en la impresora 3D para la fabricación de la pieza. Además, las máquinas también cuentan con la posibilidad de variar la configuración de los parámetros, en caso de que fuera necesario, durante el procedimiento de conformado. Dependiendo de la máquina usada o la finalidad de la pieza obtenida, el resultado puede ser final o no, y en caso de que no fuese definitivo, pasa por procesos de post-procesado para refinar su forma. A modo de resumen, se puede observar en la ilustración 2 el proceso genérico que se lleva a cabo desde principio a fin a la hora de fabricar una pieza en una impresora 3D.



Ilustración 2. Procesos de la Fabricación Aditiva (Gibson et al., 2021)

Debido a la gran evolución que ha experimentado la FA desde sus inicios y a la diversidad de usos que puede tener, es necesario estandarizar y definir una clasificación clara que facilite la caracterización de esta tecnología y la comunicación entre los profesionales que hagan uso de ellas a nivel mundial. Analizando la terminología estándar desarrollada en la Norma Española UNE-EN ISO/ASTM 52900:2015, aprobada en España a noviembre de 2017, podemos encontrar las siguientes siete categorías de FA (Zhang & Liou, 2021):

1. Proyección de aglutinante (BJ) - “proceso en el que un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo”.
2. Deposición de energía focalizada (DED) - “proceso en el cual se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan. La energía térmica focalizada significa que una fuente de energía (por ejemplo, láser, haz de electrones o arco de plasma) se enfoca o concentra para fundir los materiales que se están depositando.”
3. Extrusión de material (ME, FDM) - “proceso en el cual el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla o un orificio.”
4. Proyección de material (DOD) - “proceso en el cual se depositan selectivamente gotas del material de fabricación. Como ejemplo de estos materiales se incluyen los fotopolímeros y las ceras.”
5. Fusión de lecho de polvo (PBF, SLS, DMLS, SLM, EBM) - “proceso en el cual la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo.”
6. Laminado de hojas - “proceso en el cual el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto.”
7. Fotopolimerización en tanque o cuba (VP, SLA, DLP) - “proceso en el que el fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por luz.”

En la siguiente Ilustración podemos observar de forma esquemática la clasificación comentada:

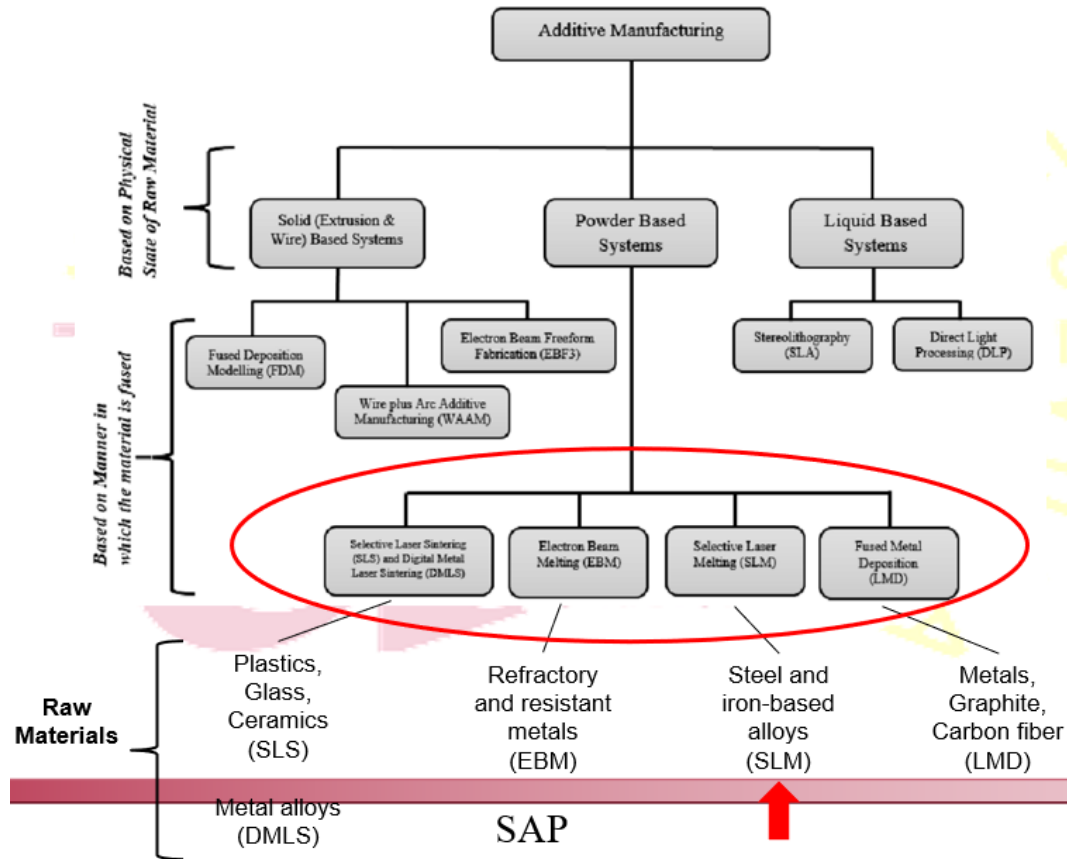


Ilustración 3. Categorías AM (Joshi & Sheikh, 2015)

De todas las técnicas mostradas en la ilustración 3, profundizaremos en Selective Laser Melting (SLM) perteneciente a la categoría fusión de lecho de polvo, puesto que es una de las técnicas más usadas en la industria y con la que trabajaremos en este proyecto.

SLM se utiliza para fundir y fusionar polvos metálicos mediante un láser de densidad de alta potencia. El polvo es muy fino y se deposita sobre un sustrato utilizando un rodillo con un espesor normalmente entre 20 µm y 100 µm. El rayo láser de densidad de alta potencia funde la sección transversal 2D de la primera capa para así fusionar esas áreas. Luego, se deposita una nueva capa de polvo sobre el sustrato y las áreas correspondientes se funden y fusionan mediante láser. Este proceso capa por capa se repite hasta lograr un producto final.

Los campos de aplicación de dicha técnica, especialmente para aleaciones de titanio, se están ampliando aún más recientemente. SLM se ha convertido en una técnica de fabricación aditiva ampliamente utilizada para fabricar piezas críticas (como turbobombas) utilizadas en la industria aeroespacial. La NASA ha decidido fabricar de forma aditiva una bomba de combustible para un motor de cohete en una sola pieza en lugar de montar cientos de componentes (incluida una turbina que gira a más de 90.000 rpm). De modo que la bomba fabricada aditivamente tiene un 45% menos de piezas en comparación con las bombas fabricadas tradicionalmente (Kucukkoc, et al., 2021).

En la Ilustración 4 podemos observar de manera visual la técnica.



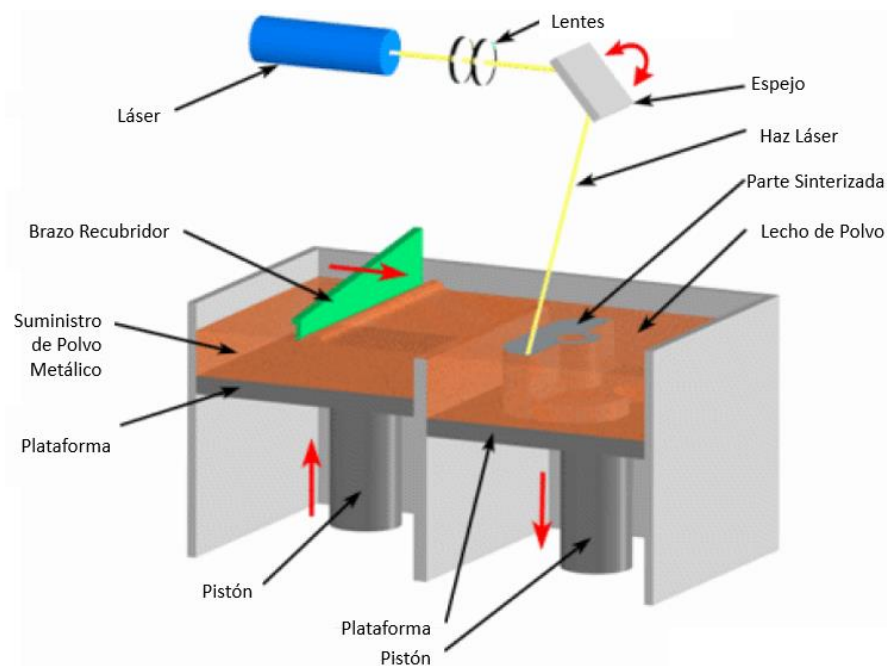


Ilustración 4. Técnica SLM (from <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>)

En distintos ámbitos, como la navegación espacial, la industria aérea o la medicina, la fabricación aditiva ha supuesto una revolución. Varias de las características de este tipo de fabricación han supuesto un avance respecto a las tecnologías de fabricación convencionales. En primer lugar, la concentración de todas las operaciones en una sola máquina supone un ahorro importante de espacio ya que no es necesario disponer de una amplia cadena de montaje. Adicionalmente, supone un ahorro en costes, ya que no son necesarias todas las máquinas, robots y herramientas que sí serían imprescindibles en una cadena de producción. A parte del ahorro anteriormente mencionado, hay que añadir el ahorro en componentes de la pieza que, en lugar de fabricarse en distintas máquinas, se construiría en su totalidad en la máquina de fabricación aditiva. Este último, además de un ahorro en costes, supone un ahorro en tiempo ya que, a parte de los tiempos de fabricación individuales de cada componente, con los necesarios tiempos de espera si existe un orden de fabricación, se puede añadir que, si un componente debe realizarse externamente, serían necesarios unos tiempos de transporte. En segundo lugar, el espacio necesario para el almacenaje del material para la fabricación será menor, ya que se almacenará el material en polvo y no en fracciones. A consecuencia de este ahorro de espacio en general, ha sido posible, por ejemplo, incorporar una máquina de fabricación aditiva en la Estación Espacial Internacional, donde el peso y el espacio ocupado son factores claves (Oh, Witherell, Lu, & Sprock, 2020). Asimismo, con vistas a factores medioambientales y al uso responsable de los materiales, esta tecnología permite la reutilización del material. Por supuesto, una gran diferenciación de la fabricación aditiva respecto a tecnologías convencionales es la posibilidad de una personalización total del producto, alcanzando prácticamente cualquier posibilidad de diseño. Esto es debido a la fabricación capa a capa, permitiendo llegar a geometrías que mediante otras técnicas sería inviable o incluso imposible.

Por el contrario, la fabricación aditiva presenta varios puntos en los que se puede mejorar. El primer punto de mejora son los tiempos de fabricación, siendo estos todavía elevados. La tardanza se debe al método de fabricación capa a capa, que requiere pasar por todas las posiciones de la pieza. El segundo aspecto por mejorar es el coste de las máquinas, que es bastante alto. Sin embargo, este aspecto es solucionable si se incrementa la demanda de estas máquinas, haciendo posible alcanzar costes de fabricación más reducidos. Por último, diversos estudios han concluido que la huella carbónica de ciertos polvos de metal es elevada, como el titanio, siendo necesario el estudio de vías de mejora en este punto .

Adicionalmente, surgen otras problemáticas que no están tan relacionadas con la tecnología en sí, sino en la organización de la producción en este tipo de máquinas. De esta manera, surge el conocido como problemas “nesting”, que hace referencia a los problemas de anidado de piezas. El anidado de piezas se refiere a la manera

de primero juntar varias piezas en un grupo para posteriormente, ser separadas. Así, una vez que las piezas sean procesadas conjuntamente en la máquina, procederán, habitualmente, a las siguientes fases de producción de manera individual. Debido a la dificultad que conlleva el anidado, se suele simplificar con vistas a obtener soluciones de manera más veloz, centrándose más en la otra problemática: la programación de las piezas (scheduling). Estas dos problemáticas serán tratadas en este proyecto.

Los estudios que se han llevado a cabo en la literatura han visto un incremento en los últimos años para analizar este problema desde diferentes enfoques y objetivos, con el fin de analizar, modelar y optimizar la cadena productiva. A pesar de esto, no se han visto gran cantidad de estudios que incluyan la máquina FA en el contexto del departamento de producción, quizás porque un mayor entendimiento respecto a esta nueva tecnología era necesaria previa a la experimentación directa (Fera et al., 2018). Actualmente está tomando gran relevancia debido a su extendido uso en la industria manufacturera y la implantación de modernos procesos de FA (Che, Hu, Zhang, & Lim, 2021), y un mayor número de artículos llevan a cabo experimentación en el ámbito de programación de la producción.

El estudio realizado por Li, Kucukkoc, & Zhang (2017) es uno de los primeros trabajos sobre la planificación de la producción de máquinas FA distribuidas para satisfacer las demandas recibidas de clientes individuales en bajas cantidades. El objetivo principal de este artículo comprendía el subproblema de “scheduling” para una máquina única. Debido a la dificultad de resolución computacional del modelo propuesto en el estudio, se propusieron dos heurísticas de construcción semiparalela para resolver el problema, basándose en el objetivo del coste medio del material. Para el problema de “nesting” se utilizó un algoritmo sencillo de agrupación para generar trabajos/estructuras y asignar piezas. Los resultados obtenidos indicaron que ambas heurísticas propuestas se comportaron bien y proporcionaron valores de rendimiento prometedores dentro de tiempos computacionales razonables, sin una dominancia clara de una sobre la otra. Los resultados de las pruebas computacionales también demostraron la necesidad de desarrollar técnicas sofisticadas de planificación y programación para los problemas FA para 3DP.

Ese mismo año se publicó el artículo de Ransikarbum, Ha, Ma, & Kim (2017) que proponía un modelo de apoyo a las decisiones basado en la optimización multiobjetivo. Aplicaba el modelo a un conjunto de partes que se introducen al sistema con una orientación prefijada y que quieren ser distribuidas en un conjunto de impresoras 3D. Los objetivos tratados en el modelo son costes operativos, equilibrio de carga entre impresoras, retraso total y el número de piezas no fabricadas. Este modelo obtiene buenos resultados para problemas pequeños. Se recomienda en el estudio utilizar heurísticas y metaheurísticas en el caso de problemas más complejos.

Previamente se habían realizado estudios de la asignación de piezas a estructuras o “nesting” como el realizado por Zhang, Gupta, & Bernard (2016), que enfocaron su trabajo en la colocación de múltiples piezas de manera óptima en la estructura de una máquina teniendo en cuenta los objetivos definidos por el usuario. Este artículo se enfoca únicamente al problema de “nesting” y evoluciona el problema de colocación en 2D. Su método constaba de un algoritmo en 2 etapas basado en un algoritmo genético. La primera de ellas es la selección de la orientación de la pieza, y la segunda, se encarga de la asignación a una estructura específica mediante una asignación más compacta reduciendo tiempo de fabricación y costes.

Posteriormente, sí podemos encontrar trabajos que aúnan ambos subproblemas. Chergui et al., (2018) presentan una heurística para analizar el problema de “nesting” y “scheduling” haciendo uso de máquinas idénticas en paralelo. Su algoritmo considera las fechas de entrega de los pedidos en la función objetivo del problema al minimizar el retraso total en la construcción de los trabajos con respecto a estas, a la vez que se maximiza el uso de las máquinas. Proponen una heurística propia basada en la regla de Earliest Due Date (EDD) que no ofrece resultados satisfactorios ya que exige de un elevado número de máquinas para conseguir un retraso del 0%. El estudio concluye con la necesidad de realizar métodos específicos que se adaptan a los requerimientos de FA.

Fera et al. (2018) analizaron la optimización de la gestión de las operaciones con una única máquina planteando el problema matemático como una función multiobjetivo basada en el equilibrio de la optimización de la puntualidad/retraso y los costes de producción. Esta función multiobjetivo tiene dos restricciones principales: una para el volumen geométrico de la cámara de impresión y otra para respetar las fechas de entrega. Construido el modelo matemático como problema NP-HARD, en este trabajo se presentó una heurística tradicional modificada basada en Algoritmos Genéticos para respetar las características tecnológicas de FA. Este algoritmo de resolución ofreció resultados exitosos en resultados y tiempo computacional.

Fera et al. (2020), desarrollaron una versión actualizada de un modelo de optimización presentado anteriormente (Fera et al., 2018) para la optimización de la gestión de las operaciones utilizando una sola máquina con la tecnología FA. En este estudio se presenta una nueva heurística basada en la búsqueda tabú (TS). Este algoritmo se aplicó sobre las mismas instancias utilizadas en el artículo previo para comparar los resultados obtenidos mediante los dos modelos comparando los indicadores de valor de la función objetivo, el valor de los costes de producción y el porcentaje de nivel de servicio. Los resultados ofrecen datos ventajosos a la búsqueda tabú en términos de rendimiento en la gestión de operaciones, en cambio el algoritmo genético (GA) obtiene mejores datos de tiempo de ejecución, significativamente al aumentar el número de piezas analizadas. Podríamos decir que el GA es más eficiente y aconsejable en problemas grandes, pero la TS nos ofrece mejores valores de función objetivo. Este autor propone la experimentación de otras heurísticas sobre estos problemas que aporten mayor visión sobre el método de resolución más indicado para la FA.

Zhang et al. (2020) en su trabajo desarrollan un algoritmo evolutivo mejorado para tres dimensiones (3DGA) combinando un algoritmo genético con una estrategia heurística para el “nesting”, haciendo uso de máquinas en paralelo. La eficiencia de la optimización se mejora mediante la introducción de un método de inicialización basado en las características del proceso de impresión 3D a través del desarrollo del correspondiente modelo de cálculo del tiempo. La experimentación realizada muestra mejores soluciones en comparación con otros algoritmos como el algoritmo genético simple, la optimización por enjambre de partículas y los algoritmos heurísticos.

Che et al., (2021) expusieron un artículo en el que se resolvía un problema de programación de máquinas de FA en paralelo no relacionadas con la selección de la orientación y las restricciones de empaquetamiento en 2D. El problema se presentó como MILP para el que se desarrolló un algoritmo de recocido simulado (SA) principalmente ejecutando el subproblema de “scheduling”. Respecto al subproblema de “nesting”, se desarrolló un algoritmo de búsqueda local aleatoria (RLS) con dos estrategias de ajuste basadas en la representación del skyline del patrón de empaquetado. Se hizo uso de la estructura de datos Trie para acelerar el procedimiento de empaquetado y se diseñaron cuatro métodos de post-optimización basados en greedy para refinar la solución. El primero de ellos basado en makespan, el segundo en función del área utilizada de cada estructura, el tercero toma como referencia la variación de altura, y el cuarto utiliza el cambio de orientación de piezas dentro de un “build” para reducir su altura máxima. Se demuestra la eficacia de la selección de la orientación para ayudar a mejorar el tiempo de producción en FA.

Alicastro et al., (2021), centran su trabajo en el problema de programación de múltiples máquinas de FA sobre instancias generadas en los artículos de Li et al., (2017) y Kucukkoc (2019), además de otros generados aleatoriamente. Proponen una metaheurística de Búsqueda Local Iterada de Aprendizaje con Refuerzo, basada en la implementación de una Búsqueda de Vecindario Variable (VNS) de Q-Learning, ya que, al aumentar el tamaño de los problemas, los tiempos computacionales también aumentan considerablemente. Llevan a cabo una comparación con las soluciones otorgadas por CPLEX y el algoritmo evolutivo propuesto por Zhang et al., (2020). Los resultados numéricos demuestran que la búsqueda local iterada de aprendizaje por refuerzo propuesta es capaz de obtener mejoras significativas en comparación con los otros enfoques de solución presentados. Los resultados del “nesting”, como, por ejemplo, las geometrías de las piezas o la orientación de los trabajos pueden afectar a los indicadores de rendimiento elegidos, como el tiempo de fabricación.

Aloui & Hadj-Hamou (2021) estudian un modelo para varios tipos de máquina en el cual busca maximizar la ratio de uso de estas y minimizar el retraso total. A diferencia de Kucukkoc (2019), emplea un método heurístico. Con respecto al algoritmo propuesto en el proyecto de Aloui & Hadj-Hamou (2021), el orden de preferencia de elección de las piezas es el siguiente: fecha de entrega, tiempo de fabricación y altura. En su estudio, se centra mayormente en la tecnología MJF. Así, estudia tanto las tareas preproducción, como son la preparación de los archivos y de la máquina, el proceso de producción, afirmando que el tiempo de producción depende de la máxima altura del grupo de piezas, como las operaciones postproceso, mayormente el enfriamiento de las piezas. Adicionalmente, realiza un modelo empírico para la obtención del tiempo de voladura, clave en el tiempo de fabricación, determinando cuáles son los parámetros de los que depende. Estos parámetros son la superficie y la complejidad de las piezas. Como en los anteriores trabajos, se considera la superficie ocupada en la máquina como una aproximación rectangular.

Finalmente, Kucukkoc, Li, & Tang (2021) muestran la íntima conexión entre el “scheduling” y el “nesting”, lo que demuestra que la minimización del área de construcción no corresponde necesariamente a la minimización del espacio de fabricación. En otras palabras, la mejor solución en términos de anidamiento no conduce a la

mejor solución en términos de programación. En consecuencia, el autor señala la necesidad de abordar ambos problemas simultáneamente. Utiliza un algoritmo genético para minimizar el “total tardiness” centrándose en el problema “nesting”. Este estudio es muy parecido al que se realizará a continuación en este proyecto, de hecho, se utilizarán las mismas instancias como datos para después experimentar con ellos, pero con la diferencia de que en este proyecto se tendrá en cuenta la posibilidad de que las piezas tengan 3 orientaciones posibles para ser fabricadas.

## 2.2 Programación de la producción en Fabricación Aditiva

El problema de programación de la producción en máquinas de fabricación aditiva (máquinas AM) consiste en fabricar un conjunto de “n” partes (“parts”) asociadas a pedidos de clientes en un conjunto de “m” máquinas AM. Cada pedido tiene una fecha de entrega fija. Los estudios se realizan para el conjunto del total de las “n” partes, cada una de ellas con información de fecha de entrega del pedido, superficie de la parte y volumen que ocupa la parte.

Las “n” partes se agrupan en “l” trabajos. Cada trabajo se realiza en una máquina AM y consiste en la ubicación y orientación de cada parte en una estructura de la máquina (“build volume”), de forma que no se puede superar la superficie ni el volumen máximo de la estructura. Las partes de una estructura se suelen fabricar simultáneamente (Oh, Witherell, Lu, & Sprock, 2020).

La siguiente ilustración 5 muestra un ejemplo de un “build volume” ya fabricado formado por múltiples partes asignadas.

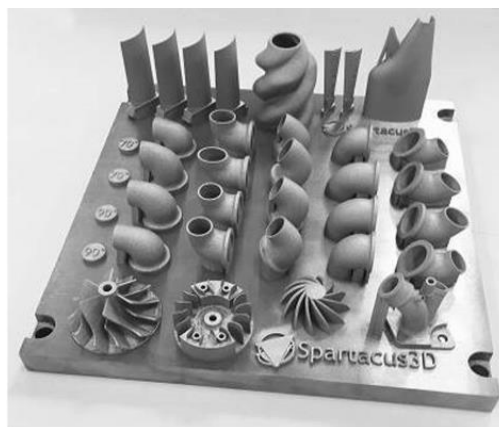


Ilustración 5. Ejemplo de trabajo o “build volume” (Fera, et al., 2018)

El problema que estamos tratando se divide en dos subproblemas denominados “Nesting” y “Scheduling”.

El primer subproblema, denominado “Nesting”, consiste en agrupar el conjunto de las partes “n” en un conjunto de trabajos “l”. De esta forma, cada pieza resultará asignada con una determinada orientación a un determinado trabajo. Cada trabajo tendrá un tiempo de producción en función de las partes asignadas y una fecha de finalización en función de la máquina y el orden en la misma. En este primer subproblema se situarán de forma óptima las partes en los espacios de las estructuras específicas de cada máquina FA considerando las limitaciones de altura, superficie y volumen, además de los tiempos de procesado y las fechas de entrega.

La siguiente ilustración 6 muestra un ejemplo de asignación de 4 partes a dos trabajos en 2D:

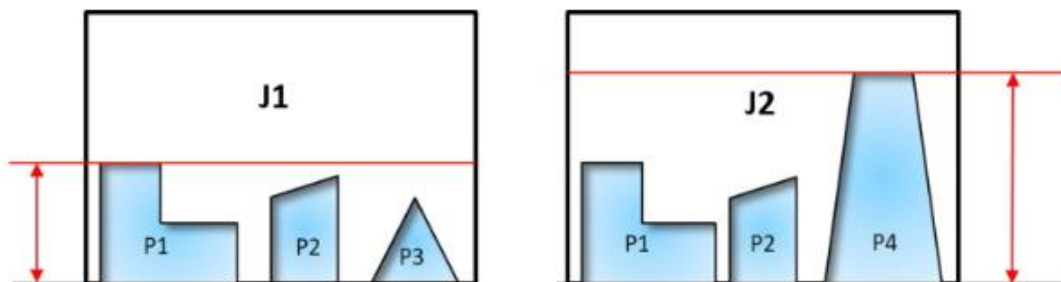


Ilustración 6. Skyline nesting (Chergui, Hadj-Hamou, & Vignat, 2018)

En la ilustración 6 podemos ver la línea roja (skyline), marcada por la pieza con mayor altura de todas las que

se encuentren asignadas al trabajo “I” y hasta que el polvo utilizado por la máquina (SLM) no supere esa línea, no se podrán retirar todas las piezas y dar este trabajo por finalizado.

Una vez formados los trabajos con la asignación de partes correspondientes, el segundo subproblema, denominado “Scheduling”, consiste en programar los trabajos en las máquinas. Cada máquina solo puede procesar un trabajo a la vez. Se define este problema como la asignación de cada trabajo a una única máquina y la ordenación en el tiempo (secuenciación) de cada trabajo en la máquina asignada considerando minimizar los retrasos.

Las siguientes ilustraciones 7 y 8 resumen ambos sub-problemas:

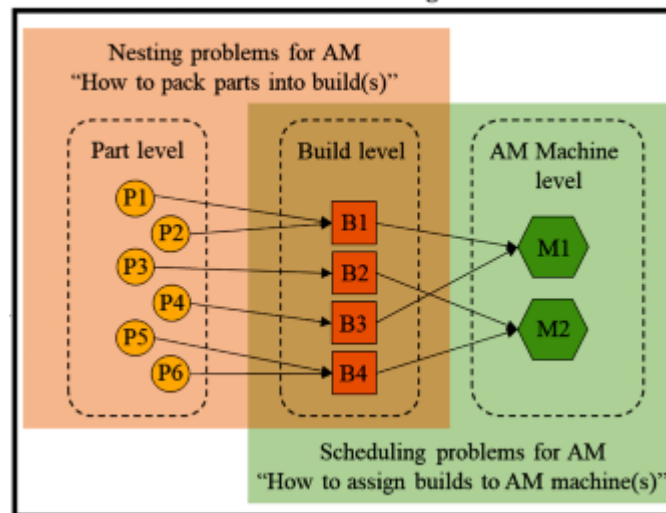


Ilustración 7. Nesting and Scheduling sub-problems. (Oh, et al., 2020)

En ambos problemas existen variantes. Según la clasificación de Oh, et al., (2020), los problemas de “Nesting and scheduling” para AM tendrían 3 parámetros: “Part level/Build level/AM machine level”.

- A nivel de Partes: todos los problemas consideran que existen “Multi-Part”, es decir, que hay múltiples tipos de partes a fabricar. Pero en algunas situaciones, cada máquina AM sólo puede fabricar 1 parte en cada estructura. En el primer caso se utiliza la clasificación “M” y en la segunda se utiliza “-”.
- A nivel de Estructuras: los problemas se pueden clasificar en “Single-Build”, cuando todas las estructuras son iguales (la misma agrupación para todas las partes) o “Multi-Build” cuando las estructuras son diferentes.
- A nivel de Máquinas: los problemas se pueden clasificar en “Single-Machine” o “Multi-Machine”, si solo hay una máquina o son varias máquinas en paralelo. En este último caso, a su vez pueden ser:
  - o “Identical Machines” si las máquinas son idénticas
  - o “Non-Identical Machines” si las máquinas son diferentes

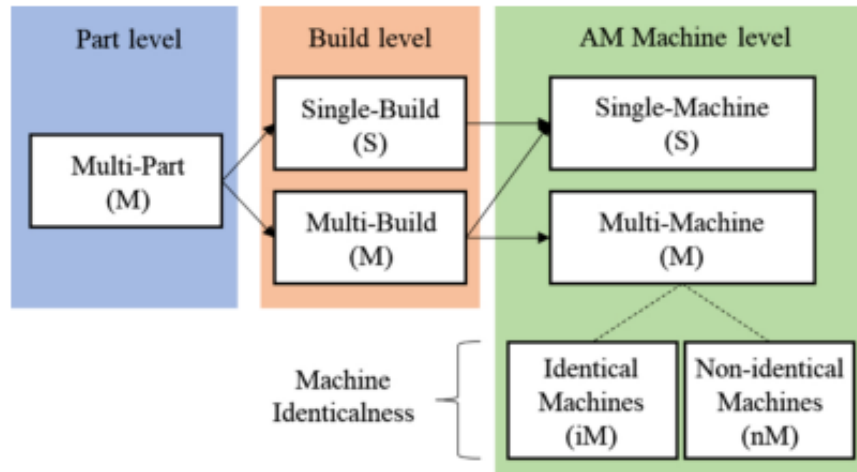


Ilustración 8. Clasificación problemas “Nesting and Scheduling”. (Oh, et al., 2020)

La combinación de estos 3 parámetros da como resultado la generación de seis clases de problemas a tratar estudiados en la literatura (Oh, et al., 2020):

- M/S/S: se centran en estudiar el problema “Nesting” en la parte de ubicación y orientación de las partes, similar al problema “bin-packing”.
- M/M/S: se centran en agrupar las partes en diferentes estructuras (nesting), que se realizan en la misma máquina AM, por lo que hay que ordenar en el tiempo cada estructura (scheduling).
- M/M/iM: como hay máquinas AM en paralelo idénticas, además hay que asignar las estructuras formadas a cada máquina y luego secuenciarlas en cada una.
- M/M/nM: como las máquinas AM en paralelo no son idénticas, además hay que asignar las partes a una estructura de una máquina concreta pues las estructuras pueden ser distintas en tamaño y forma. Este es el más complejo, a la vez el más cercano a la realidad y el que trataremos en este proyecto.
- -/M/iM: cada máquina AM sólo procesa una parte en la estructura, por lo que no es necesario el nesting.
- -/M/nM: hay que considerar que cada parte se procesa en una estructura, pero cada máquina es diferente.

Para cada tipo de problema existen criterios específicos en los estudios y que son:

1. Dimensionalidad: *2D*; *3D*
2. Grado de libertad en rotación de las partes: *ABC*; *C*
3. Limitaciones en volumen de las estructuras: *Bounded*; *Unbounded*
4. Conjunto de partes a agrupar: *Full*; *Subset*
5. Métodos de generación de estructuras: *Nested*; *Grouped*; *Created*; *Given*
6. Modelos de secuenciación: *Single-machine (SM)*; *Parallel-machine (PM)*; *Flow-shop (FS)*
7. Criterio de secuenciación: *Due-date (Du)*; *Material (Ma)*; *Quality (Qu)*
8. Características de máquinas no idénticas: *Location (Lo)*; *Size (Si)*; *Process parameter (Pr)*

En los problemas exclusivos de Nesting (M/S/S) se aplican los 4 primeros criterios. En los problemas M/M/S y M/M/iM se suelen considerar los criterios 1, 2, 5, 6 y 7 con “Bounded” y “Full”. En los problemas M/M/nM además se considera el criterio 8. Finalmente, para los problemas -/M/iM y -/M/nM no se aplican los 4 primeros criterios.

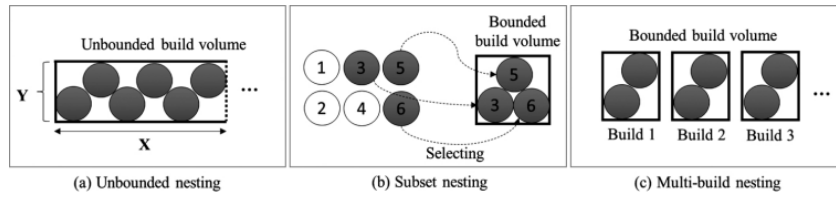


Ilustración 9. Nesting types (Oh, Witherell, Lu, & Sprock, 2020)

Finalmente, las funciones objetivas son muy diversas y dependen de los criterios seleccionados por los autores. En los casos de "Nesting" son objetivos relacionados con la maximización del "nesting rate" o la minimización del "maximum build height". En los casos de Scheduling, los objetivos se centran principalmente en la minimización de los retrasos/adelantos o de los costes o del makespan.



## 2.3 El problema *Nesting* en Fabricación Aditiva

El problema “nesting” en el contexto de AM se puede definir de la siguiente manera: *dado un conjunto de piezas para procesar en un conjunto de recursos de AM, determine cómo agrupar y colocar mejor las piezas en los “build volumes”* (Framinan, Perez-Gonzalez, & Fernandez-Viagas, 2023). Este problema también se denomina en la literatura “optimal packing” (ver, por ejemplo, Canellidis et al., (2016)). Los problemas “nesting” pueden considerarse un tipo de “cutting and packing problema” y se han tratado intensamente en la literatura. Sin embargo, cabe mencionar que el problema “nesting” de AM representa el caso más extremo de empaquetamiento 3D, ya que las piezas generalmente tienen tamaños arbitrarios y no hay límites en la orientación de la pieza o la posición en el volumen (Dickinson y Knopf, 2002).

La primera aplicación de técnicas OR para el problema “nesting” AM es Wodziak et al. (1994), quienes utilizan algoritmos genéticos para resolver la versión 2D del problema con el objetivo de minimizar la entrada, mientras que Ikonen et al. (1997) abordan por primera vez la versión 3D. Las mejoras posteriores a su método en términos de tiempos de cálculo son proporcionadas por Dickinson y Knopf (1998), Hur et al. (2001) y Dickinson y Knopf (2002). Si bien se han considerado otros objetivos, el primer intento de integrar diferentes objetivos (incluido el “build time”, las estructuras de soporte o la calidad de las piezas) lo llevan a cabo Gogate y Pande (2008).

La mayoría de los investigadores que abordan la versión 3D del problema utilizan variaciones de la llamada heurística “Deepest Bottom-Left-Fill” (DBLF), que considera la posición más profunda en el “build volume”, empaquetando las piezas lo más cerca posible de la parte inferior e izquierda (en ese orden) en el nivel más profundo posible. Este enfoque generalmente se ha combinado con metaheurísticas, siendo el principal desafío lograr un equilibrio adecuado entre la calidad de la solución (es decir, la minimización de las brechas en el “build volume”) y el esfuerzo computacional (que aumenta a medida que se codifica el volumen de la pieza de forma más precisa y con la estrategia elegida para colocar las piezas). Un estudio reciente sobre esta compensación es el de Araújo et al. (2020b). En cuanto a las metaheurísticas empleadas, cabe destacar que la inmensa mayoría de las contribuciones utilizan Algoritmos Genéticos.

Dentro de este problema podemos encontrar otro subproblema llamado: “Optimal build orientation”. Este problema (también denominado “optimal part orientation”) se puede definir de la siguiente manera: dada una pieza que se va a procesar en un recurso de fabricación aditiva, se determina la mejor orientación de la construcción de acuerdo con una serie de objetivos de producción.

Dado que en FA la pieza se construye capa por capa, el objeto crece a lo largo de la llamada dirección de construcción (“build direction”), y esto afecta a una serie de propiedades (incluidos el coste, el tiempo y la calidad) de la pieza fabricada. En términos generales, las capas son paralelas a la plataforma de construcción, por lo que la pieza se construye a lo largo del eje Z de la máquina AM, consulte la Ilustración 10. Por lo tanto, dada una pieza a construir (generalmente representada por un modelo 3D de la pieza), el modelo se puede colocar en la plataforma de construcción (y entonces, la dirección de construcción y el eje Z del modelo coinciden), o se puede girar a lo largo de los ejes X e Y como en la figura de la derecha de la Ilustración 10. Por lo tanto, la tupla  $(\alpha, \beta)$  representa una orientación de construcción y determina cómo se construirá la pieza capa por capa. A su vez, esto determina una serie de propiedades de la pieza, incluidas las características mecánicas (es decir, el límite elástico y de tracción a lo largo de la capa son generalmente mayores que entre las capas), características de calidad (es decir, los errores dimensionales y la rugosidad de la superficie aparecen más comúnmente entre las capas), el tiempo de construcción (por ejemplo, la altura del edificio se ve claramente afectada por la orientación de la pieza) y los costes de construcción (como, por ejemplo, los costes de energía o los costes de posprocesamiento, claramente afectados por el tiempo y la calidad de construcción antes mencionados), entre otros Framinan, Perez-Gonzalez, & Fernandez-Viagas (2023).

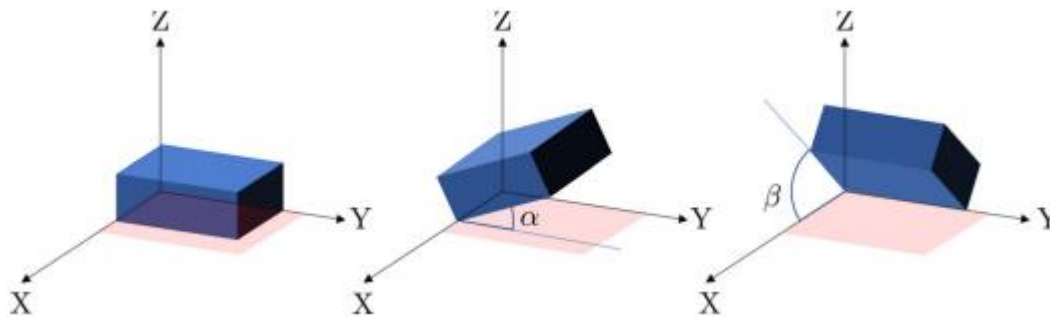


Ilustración 10. Orientaciones de una pieza en los ejes X, Y, Z (Framinan, et al., 2023).

Este problema ha sido tratado intensamente en la literatura y los métodos para abordarlo pueden clasificarse como métodos de un solo paso o métodos de dos pasos. Los métodos de un solo paso desarrollan un algoritmo de búsqueda exhaustivo o utilizan una técnica de optimización para obtener una solución del espacio de soluciones. Básicamente, dado un modelo 3D de la pieza y un conjunto de objetivos de producción, estos métodos mejoran iterativamente la mejor solución hasta ahora generando primero una nueva orientación de construcción (generalmente girando la pieza paso a paso a lo largo de uno de los ejes), y luego obtener estimaciones de los valores de los objetivos de producción si la pieza se produce de acuerdo con esta orientación de construcción.

En los métodos de dos pasos, el primer paso consiste en pasar de un espacio de búsqueda infinito (todas las orientaciones de construcción posibles) a un espacio de búsqueda finito compuesto por un conjunto de orientaciones de construcción alternativas (ABOs). Este conjunto se obtiene mediante varias técnicas (incluido “feature recognition”, “convex hull generation”, o “facet clustering”). El segundo paso consiste en utilizar algún método de optimización, generalmente multicriterio, para seleccionar una orientación de construcción del conjunto (la llamada “OBO” o “Optimal Build Orientation”). En estos métodos, se ahorra el esfuerzo computacional requerido para evaluar muchas orientaciones de construcción que no difieren esencialmente de otras ya exploradas. En cambio, se derivan reglas basadas en las preferencias de los usuarios o en los patrones deseados para la orientación de la pieza, de modo que se obtiene un conjunto finito de orientaciones de construcción. El principal problema de estos métodos es que, no importa qué técnica se utilice para seleccionar el conjunto de orientaciones de construcción alternativas, no hay garantía de que se incluya la óptima en el conjunto. Además, algunas de las técnicas de selección tienen limitaciones y no pueden abordar piezas de forma libre.

El primer trabajo que aborda el problema es el de Frank y Fadel (1995), quienes presentan un sistema experto basado en entrevistas a usuarios para ayudar a seleccionar la mejor orientación de construcción. Lan et al. (1997) encuentran que existe una relación entre el tiempo de construcción y la altura de construcción (ya que está relacionado con el número de capas) y utilizan este hecho para proponer un algoritmo geométrico específico para el problema. El modelo que describe la relación entre el tiempo de construcción y la altura es posteriormente refinado por varias contribuciones, como Xu et al. (1997), Thrimurthulu et al. (2004), Khodaygan y Golmohammadi (2018), Griffiths et al. (2019), o Di Angelo et al. (2020), para tener en cuenta otros aspectos que influyen en el tiempo de construcción, como el espesor de la capa, la generación de estructuras de soporte o el volumen.

Dada la naturaleza multiobjetivo inherente del problema, muchos enfoques ponderan los objetivos de producción o abordan el problema de optimización multiobjetivo, ya sea utilizando “Pareto-fronts” o técnicas de toma de decisiones multicriterio como DEA (Ransikarbum & Kim, 2017), AHP (Ransikarbum et al., 2021), TOPSIS (Di Angelo et al., 2020) o “fuzzy decision making” de múltiples atributos (Qin et al., 2019).

En sistemas donde las piezas llegan una por una y no se puede predecir el tamaño y la forma de las siguientes piezas, esto provoca (en algunos casos prohibitivamente) una pérdida de tiempo optimizar la orientación de construcción de cada pieza. En estos casos, se puede aplicar un método de decisión de orientación de construcción o *build orientation policy*. De manera similar a por ejemplo, reglas de asignación, estas políticas se basan en una característica del trabajo que puede identificarse fácilmente. Algunas políticas a destacar son

Laying *Policy* (LP) donde la pieza se coloca de manera que tenga su altura más baja, o *Standing Policy* (SP) donde la pieza se coloca de manera que tenga su altura más alta. Un conjunto de estas políticas se investiga en Oh et al. (2020b).

Finalmente, vale la pena mencionar que la mayoría de los artículos se centran en encontrar la orientación de construcción óptima para una sola pieza. Sin embargo, dado que una construcción normalmente consta de un grupo de piezas, se debe encontrar una orientación de construcción óptima (común). Este problema es abordado por Zhang et al. (2017) utilizando un procedimiento de dos pasos (Framinan, et al., 2023).

## 3 DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En este capítulo se definirá de manera descriptiva y matemática el problema específico de este proyecto, definiendo además los parámetros de entrada que se necesitan. Se empieza definiendo los problemas “2D Bin Packing para el Nesting”, ya que contemplan un cierto parecido con el problema en estudio. Los siguientes apartados ya se centrarán de una manera más profunda y específica en nuestro problema, describiendo problemas con múltiples orientaciones, con fechas de disponibilidad y entrega, y definiendo las 3 funciones objetivas que se estudian (Min. “Makespan”, “Total Costs” y “Total Tardiness”, centrándonos en este último). En los últimos dos apartados nos apoyaremos en los artículos de Oh et al., (2020) y Chergui, Hadj-Hamou, & Vignat (2018).

### 3.1 Problemas *2D Bin Packing* para el Nesting

Este apartado se basará mayormente en el artículo de Lodi, Martello, & Vigo (2002).

En el problema 2D Bin Packing (2BP), se nos da un conjunto de  $n$  elementos rectangulares  $j \in J = \{1, \dots, n\}$ , cada uno con ancho  $w_j$  y alto  $h_j$ , y un número ilimitado de contenedores rectangulares idénticos finitos, que tienen ancho  $W$  y alto  $H$ . El problema es asignar, sin superponer, todos los artículos al número mínimo de contenedores, con sus bordes paralelos a los de los contenedores. Se supone que los elementos tienen orientación fija, es decir, no se pueden girar.

El problema 2BP tiene muchas aplicaciones industriales, especialmente en el corte (industrias de la madera y el vidrio) y el embalaje (transporte y almacenamiento). Ciertas aplicaciones pueden requerir restricciones y/o suposiciones adicionales.

El caso especial donde  $w_j = W$  ( $j = 1, \dots, n$ ) es el famoso problema de 1D Bin Packing (1BP): dividir  $n$  elementos, cada uno con un tamaño asociado  $h_j$ , en el número mínimo de subconjuntos para que la suma de los tamaños en cada subconjunto no excede una capacidad determinada  $H$ . Dado que se sabe que 1BP es fuertemente NP-hard, lo mismo se aplica a 2BP.

En este artículo examinamos los avances recientes obtenidos para el problema del 2D Bin Packing, con especial énfasis en algoritmos exactos y enfoques heurísticos y metaheurísticos efectivos. En cuanto a la heurística, sólo consideraremos algoritmos off-line, para los cuales se supone que el algoritmo tiene pleno conocimiento de toda la entrada.

Sin pérdida de generalidad, asumiremos a lo largo del artículo que todos los datos de entrada son números enteros positivos y que  $w_j \leq W$  y  $h_j \leq H$  ( $j = 1, \dots, n$ ).

Existen 4 tipos de algoritmos para resolver estos problemas y sus respectivas variantes:

• **Upper Bounds (Límite superior)**

Aquí podemos encontrar los algoritmos más básicos y dónde podremos ver de forma sencilla la idea del problema 2D Bin Packing. La mayoría de los algoritmos off-line de la literatura son de tipo greedy y se pueden clasificar en dos familias:

- Algoritmos de una fase, directamente empaquetan los artículos en contenedores finitos.
- Algoritmos de 2 fases, comienza empaquetando los artículos en una sola tira, es decir, un contenedor que tiene un ancho  $W$  y una altura infinita. En la segunda fase, la solución de tira se utiliza para construir un empaque en contenedores finitos.

Además, la mayoría de los enfoques son algoritmos de nivel, es decir, el embalaje en contenedor/tira se obtiene colocando los artículos, de izquierda a derecha, en filas formando niveles. El primer nivel es la parte inferior del contenedor/tira, y los niveles posteriores se producen mediante la línea horizontal que coincide con la parte superior del artículo más alto empaquetado en el nivel inferior. Se han derivado tres estrategias clásicas para el empaquetado de niveles a partir de algoritmos famosos para el caso unidimensional. En cada caso, los artículos se clasifican inicialmente por altura no decreciente y se empaquetan en la secuencia correspondiente. Sea “j” el elemento actual y “s” el último nivel creado, distinguimos 3 principales estrategias:

- Next-Fit Decreasing Height (NFDH): el elemento  $j$  se empaqueta justificado a la izquierda en el nivel  $s$ , si encaja. De lo contrario, se crea un nuevo nivel ( $s := s + 1$ ) y se empaqueta  $j$  justificado a la izquierda en él.
- First-Fit Decreasing Height (FFDH): El artículo  $j$  se empaqueta justificado a la izquierda en el primer nivel donde encaja, si corresponde. Si ningún nivel puede acomodar  $j$ , se inicializa un nuevo nivel como en NFDH. Esta estrategia, con algunas variantes, es la que utilizaremos en este trabajo y se encuentra definido en el apartado 4.2.
- Best-Fit Decreasing Height (BFDH): El artículo  $j$  se empaqueta justificado a la izquierda en ese nivel, entre aquellos en los que cabe, para los cuales el espacio horizontal no utilizado es mínimo. Si ningún nivel puede acomodar  $j$ , se inicializa un nuevo nivel como en NFDH.

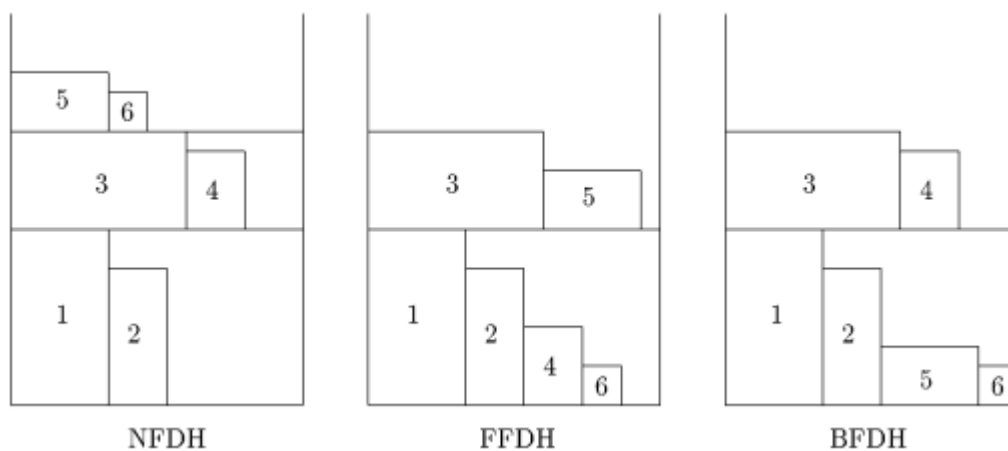


Ilustración 11. Algoritmos de nivel (Lodi, Martello, & Vigo, 2002)

Con estas 3 estrategias, diferentes investigadores las han combinado para encontrar la mejor solución minimizando los espacios vacíos en cada contenedor.

### • Lower Bounds (Límite inferior)

Tiene como objetivo encontrar una cota inferior del número mínimo de contenedores (“bins”) necesarios para empaquetar un conjunto de objetos rectangulares en un espacio dado. Buenos límites inferiores del valor de la solución óptima son importantes tanto en la implementación de enfoques enumerativos exactos como en la evaluación empírica de soluciones aproximadas. El límite más simple para 2BP es el límite inferior continuo computable en tiempo lineal:

$$L_0 = \left\lceil \frac{\sum_{j=1}^n w_j h_j}{WH} \right\rceil$$

Existen límites más complejos que se pueden consultar en (Lodi, Martello, & Vigo, 2002).

### • Algoritmos exactos

Martello & Vigo (1998) presentaron un enfoque enumerativo para la solución exacta de 2BP. Los elementos se clasifican inicialmente en orden no creciente de su área. Un procedimiento de reducción intenta determinar el embalaje óptimo de algunos contenedores, reduciendo así el tamaño de la instancia. Luego se obtiene heurísticamente una primera solución vigente, de valor  $z^*$ .

El algoritmo se basa en un esquema de ramificación de dos niveles:

- Árbol de decisión de rama exterior: en cada nodo de decisión, se asigna un artículo a un contenedor sin especificar su posición real.
- Árbol de decisión de rama interna: se determina un embalaje factible (si lo hay) para los artículos actualmente asignados a un contenedor, posiblemente mediante la enumeración de todos los patrones posibles.

La búsqueda en el árbol de decisión de la rama exterior se realiza primero en profundidad, utilizando los límites inferiores descritos en la sección anterior. Siempre que sea posible establecer que no se pueden asignar más elementos no asignados a un contenedor inicializado determinado, dicho contenedor se cierra: un contenedor inicializado y no cerrado se considera activo. En el nivel  $k$  ( $k = 1, \dots, n$ ), el elemento  $k$  se asigna, a su vez, a todos los contenedores activos  $y$ , posiblemente, a uno nuevo (si el número total de contenedores activos y cerrados es inferior a  $z^* - 1$ ).

Primero se comprueba heurísticamente la viabilidad de la asignación de un artículo a un contenedor.

Se calcula un límite inferior  $L(I)$  para la instancia  $I$  definida por los elementos actualmente asignados al contenedor: si  $L(I) > 1$ , se realiza un retroceso. De lo contrario, se aplican algoritmos heurísticos a  $I$ : si se encuentra un empaquetado de un solo contenedor factible, se reanuda la enumeración externa. De lo contrario, el esquema de ramificación interno enumera todas las formas posibles de empaquetar  $I$  en un contenedor a través de la estrategia descendente más a la izquierda: en cada nivel, el siguiente artículo se coloca, a su vez, en todas las posiciones donde tiene su borde izquierdo adyacente al borde derecho de otro artículo o al borde izquierdo del contenedor, y su borde inferior adyacente al borde superior de otro artículo o al borde inferior del contenedor. Tan pronto como se encuentre un embalaje viable para todos los elementos de  $I$ , se reanuda la enumeración externa. Si no existe tal embalaje, se realiza un retroceso externo.

Siempre que la asignación actual sea factible, la posibilidad de cerrar el contenedor se verifica mediante cálculos de límite inferior.

### • Metaheurísticas

En los últimos años, las técnicas metaheurísticas se han convertido en una herramienta popular para la solución aproximada de problemas difíciles de optimización combinatoria. Lodi, Martello, & Vigo (1999) desarrollaron algoritmos de búsqueda tabú efectivos para 2BP y para algunas de las variantes analizadas en la siguiente sección. Describimos aquí brevemente el marco unificado de búsqueda tabú dado en el artículo citado, cuya característica principal es la adopción de un esquema de búsqueda y una vecindad que son independientes del

problema de empaque específico a resolver. Por tanto, el marco se puede utilizar para prácticamente cualquier variante de 2BP, simplemente cambiando el algoritmo determinista específico utilizado para evaluar los movimientos dentro de la búsqueda de vecindad.

Dada una solución actual, los movimientos la modifican cambiando el embalaje de un subconjunto  $S$  de artículos, intentando vaciar un contenedor objetivo específico. Sea  $S_i$  el conjunto de artículos actualmente empacados en el contenedor  $i$ : el contenedor objetivo  $t$  es el que minimiza, sobre todos los contenedores  $i$ , la función

$$\varphi(S_i) = \alpha \frac{\sum_{j \in S_i} w_j h_j}{WH} - \frac{|S_i|}{n}$$

( $\alpha$  es un peso positivo preespecificado), que da una medida de la facilidad de vaciar el contenedor. De hecho, favorece los contenedores objetivo que contienen un área pequeña y una cantidad relativamente grande de artículos.

Una vez que se ha seleccionado el contenedor de destino, el subconjunto  $S$  se define para incluir un artículo,  $j$ , del contenedor de destino y el contenido actual de otros  $k$  contenedores. El nuevo empaquetado para  $S$  se obtiene ejecutando un algoritmo heurístico apropiado  $A$  en  $S$ . El valor del parámetro  $k$ , que define el tamaño y la estructura de la vecindad actual, se actualiza automáticamente durante la búsqueda.

Si el movimiento empaqueta los artículos de  $S$  en  $k$  (o menos) contenedores, es decir, el artículo  $j$  se ha eliminado del contenedor de destino, se selecciona un nuevo artículo, se define un nuevo conjunto  $S$  en consecuencia y se realiza un nuevo movimiento. De lo contrario,  $S$  se cambia seleccionando un conjunto diferente de  $k$  contenedores, o un elemento  $j$  diferente del contenedor de destino (si se han intentado todas las configuraciones posibles de  $k$  contenedores para el  $j$  actual).

Si el algoritmo se atasca, es decir, el contenedor de destino no se vacía, la vecindad se amplía aumentando el valor de  $k$ , hasta un límite superior prefijado. Hay una lista y una tenencia tabúes para cada valor de  $k$ .

Se obtiene una solución inicial ejecutando el algoritmo  $A$  en la instancia completa, mientras que la solución de búsqueda tabú inicial consiste en empaquetar un artículo por contenedor. En situaciones especiales, a un movimiento le sigue una acción de diversificación. La ejecución se detiene tan pronto como se encuentra una solución óptima comprobada o se alcanza un límite de tiempo.

#### • Variantes

Los problemas de embalaje en contenedores bidimensionales ocurren en varios contextos del mundo real, especialmente en las industrias de corte y embalaje. Como consecuencia de ello, surgen una serie de variantes, según aplicaciones específicas. En la mayoría de los casos, los requisitos adicionales se refieren a la orientación y/o al corte con guillotina.

En los problemas de embalaje en contenedores y en tiras considerados hasta ahora hemos supuesto que los artículos tienen una orientación fija (es decir, no pueden rotarse) y que no se impone ninguna restricción a los patrones de corte. En ciertos contextos del mundo real, se puede permitir la rotación de artículos (generalmente  $90^\circ$ ) para producir mejores empaques.

Esta variante de las orientaciones de las piezas la desarrollamos en el siguiente apartado.

### 3.2 Problemas con múltiples orientaciones

En la fabricación aditiva, dado que una capa se construye sobre otra, para construir una pieza donde su capa superior sea mayor que las inferiores, pueden ser necesarias estructuras de soporte para evitar la deformación de la pieza cuando se construye la capa más grande. Por lo tanto, algunas capas pueden tener áreas (normalmente con menor densidad y/o material más barato/rápido) cuya única función es servir de soporte para las capas más grandes. Obviamente, esto aumenta el tiempo y los costos (material, energía) necesarios para construir la pieza, y está claro que usar una orientación de construcción diferente del modelo CAD (es decir, simplemente darle la vuelta al modelo) puede resultar en construcciones más rápidas y económicas. Además, como se analiza más adelante, las propiedades físicas de la pieza son diferentes según la orientación, por lo que encontrar la orientación de construcción óptima para una pieza es una decisión importante en FA (Framinan, Perez-Gonzalez, & Fernandez-Viagas, 2023).

En la siguiente ilustración se muestra un ejemplo de 6 posibles orientaciones de una misma parte:

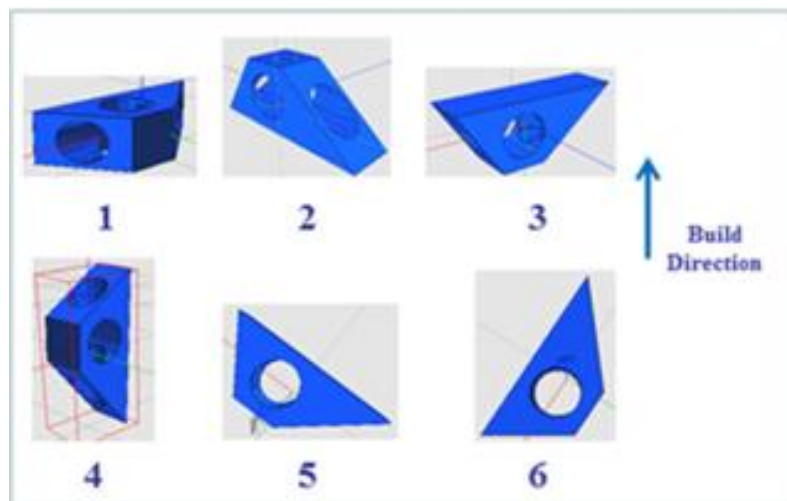


Ilustración 12. Posibles orientaciones de una parte (Lodi, Martello, & Vigo, 2002)

Aunque pueden existir infinitas orientaciones, en la realidad sólo unos subconjuntos de orientaciones prácticas son seleccionables. La definición de este conjunto de orientaciones alternativas de cada parte es una primera tarea que se basa en calidad, costes o tiempos y que para nuestro problema será información de partida.

Es decir, para nuestro estudio, existirá un conjunto de “ $n_g$ ” partes a fabricar con el mismo material. Cada una de las partes “ $i$ ” tendrá un conjunto de “ $K(i)$ ” orientaciones alternativas prácticas. Cada orientación alternativa “ $k$ ” de una misma parte “ $i$ ” se conoce:

- La superficie o área que ocupa proyectada sobre la bandeja de la estructura “ $A_{ik}$ ” ( $\text{cm}^2$ )
- La altura que ocupa desde la bandeja de la estructura “ $H_{ik}$ ” (cm)
- El volumen que ocupa en la estructura, que no depende de la orientación “ $V_i$ ” ( $\text{cm}^3$ )

Para la fabricación de todas las partes existirán “ $n_m$ ” máquinas de fabricación aditiva por capas, cada una de ellas con características propias (área de la bandeja, altura máxima, tiempos de preparación o velocidades de producción). Podría ocurrir que alguna parte no se puede fabricar en algunas de las máquinas. Las principales características de las máquinas son:

- El tiempo que se emplea por unidad de volumen del material “ $VT_m$ ” ( $\text{h}/\text{cm}^3$ )
- El tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura y que se repite hasta alcanzar la altura máxima “ $HT_m$ ” ( $\text{h}/\text{cm}$ )
- El tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo “ $SET_m$ ” (h)
- La superficie de la bandeja que sirve de base “ $MA_m$ ” ( $\text{cm}^2$ )
- La altura máxima de procesamiento “ $MH_m$ ” (cm)



El problema a estudiar consistirá en repartir todas las “ $n_g$ ” partes a fabricar entre diferentes estructuras, de forma que en cada estructura pueden ir una o varias partes y cada parte se fabricará con una de sus orientaciones prácticas. Cada estructura se considera un trabajo a realizar en una de las máquinas disponibles, de forma que los tamaños de las bandejas y las alturas máximas en cada máquina pueden ser diferentes.

### 3.3 Problemas con fechas de disponibilidad y entrega. Objetivos

Además de agrupar las partes en trabajos, decidir la orientación de cada parte entre las alternativas y decidir en qué máquina va cada trabajo, hay que decidir el orden de fabricación de cada trabajo en la máquina asignada.

Para seleccionar la mejor solución entre todas las posibles, se van a plantear diversos modelos de programación matemática:

- **Modelo “AM-Cost”**: modelo de programación lineal entera (ILP) de planificación de la producción que minimiza los costes totales.

El coste de producción de cada trabajo “ $j$ ” en cada máquina “ $m$ ” será la suma del coste de preparación de la máquina en cada cambio de trabajo (*cost of setting up*), más el coste asociadas a las capas de polvo (*cost of powder layering*) más el coste de material empleado y el de operación (*cost of material melting*).

Para calcular los costes de producción, hay que definir los costes unitarios de producción:

- o El coste por unidad de volumen del material “MC” ( $\$/\text{cm}^3$ )
- o El coste de operación por unidad de tiempo empleado en cada máquina “ $\text{TC}_m$ ” ( $\$/\text{h}$ )
- o El coste de mano de obra por unidad de tiempo para preparar la máquina “HC” ( $\$/\text{h}$ )

También haría falta añadir la siguiente variable auxiliar:

- o  $\text{JPC}_{jm}$ : Coste de producción de la estructura  $j$ -ésima en la máquina  $m$

- **Modelo “AM-Makespan”**: modelo de programación lineal mixta-entera (MILP) de planificación y programación de la producción que minimiza el tiempo de finalización del último trabajo (*makespan*).

Haría falta añadir la siguiente variable auxiliar:

- o  $C_{\max}$ : Tiempo de finalización del último trabajo (*makespan*)

- **Modelo “AM-Tardiness”**: modelo de programación lineal mixta-entera (MILP) de planificación y programación de la producción que minimizan los retrasos (*tardiness*) de forma ponderada asociados a las partes o a los pedidos de un conjunto de partes.

Haría falta añadir la siguiente variable auxiliar:

- o  $\text{CC}_i$ : Tiempo de finalización de la parte  $i$

Todos ellos comparten las siguientes variables:

#### *Variables de decisión*

- $X_{ijmk}$ : = 1, si la parte  $i$  se fabrica con orientación  $k$  en el trabajo  $j$ -ésimo de la máquina  $m$

#### *Variables auxiliares*

- $Z_{jm}$ : = 1, si alguna parte es asignada al trabajo  $j$ -ésimo de la máquina  $m$  (si  $\sum_i X_{ij} \geq 1$ )
- $H_{\max j}$ : Máxima altura de cualquier parte del trabajo  $j$

Y los últimos dos modelos (Makespan y Tardiness) comparten:

**Variables auxiliares**

- $PT_{jm}$ : Tiempo de producción del trabajo j-ésimo en la máquina m
- $C_{jm}$ : Tiempo de finalización del trabajo j-ésimo en la máquina m

En este capítulo nos centraremos en el **Modelo “AM-Tardiness”** para el cual hay que añadir 2 nuevos parámetros de entrada específicos para este:

- Fecha de disponibilidad o “release date” de la parte i ( $RD_i$ ): Cuando las partes tienen una fecha determinada para poder ser fabricadas.
- Fecha de entrega o “due date” de la parte i ( $DD_i$ ): Cuando las partes tienen una fecha determinada para ser entregadas al cliente.

En este modelo se resuelve el problema de planificación en Fabricación Aditiva donde existe un conjunto de partes, cada una de ellas con un conjunto de orientaciones alternativas para su fabricación en un conjunto de máquinas de fabricación aditiva diferentes, de forma que las partes se pueden agrupar en trabajos para su fabricación conjunta en cada máquina. El objetivo será encontrar la solución que minimiza los retrasos (*tardiness*) asociados a considerar que cada parte es un pedido de 1 unidad.

A continuación, se definirá el modelo matemático del modelo, el cual usaremos en el siguiente capítulo para resolver los problemas:

La siguiente tabla 1 muestra los **conjuntos** utilizados en el modelo y sus respectivos **índices**.

Tabla 1. Conjuntos e índices del modelo

Conjunto (Sets)	Definición	Índice
<b>G</b>	Piezas, partes o geometrías	$i = 1, \dots, n_g$
<b>B</b>	Trabajos o estructuras (Jobs)	$j = 1, \dots, n_b$
<b>M</b>	Máquinas de fabricación aditiva (AM)	$m = 1, \dots, n_m$
<b>K</b>	Orientaciones prácticas de cada parte	$k = 1, \dots, n_o(i)$

La siguiente tabla 2 recoge los **parámetros** involucrados en el modelo junto a sus respectivas unidades de medida. Estos parámetros están relacionados con las características físicas de las piezas, jobs y máquinas de forma que definen la altura, área y volumen de éstas. Además, se añaden las componentes de tiempo y coste directamente aplicables sobre la evaluación de costes de producción.

Tabla 2. Parámetros del modelo

Parámetro	Definición	Unidades
$V_i$	Volumen de la parte i	$cm^3$
$A_{ik}$	Área proyectada sobre la bandeja de la parte i con orientación k	$cm$
$H_{ik}$	Altura de la parte i con orientación k	$cm^2$
$VT_m$	Tiempo que se emplea por unidad de volumen del material en máquina m	$h/cm^3$
$HT_m$	Tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura en máquina m	$h/cm$
$SET_m$	Tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo en máquina m	$h$
$MA_m$	Área máxima de la bandeja de cualquier estructura en máquina m	$cm^2$
$MH_m$	Altura máxima que se puede procesar en máquina m	$cm$
$DD_i$	Fecha de entrega de la parte i ( <i>due date</i> )	$s$
$RD_i$	Fecha de disponibilidad de la parte i ( <i>release date</i> )	$s$

El modelo contiene la **variable de decisión** que relaciona los 4 conjuntos del modelo. Esta variable es de tipo binaria y adquiere el valor 1 en el caso de asignación de una pieza i, con orientación k, al trabajo j perteneciente a la máquina m.

Tabla 3. Variable de decisión del modelo

Variable	Definición	Tipo
$X_{ijmk}$	1, si la parte i se fabrica con orientación k en el trabajo j-ésimo de la máquina m	Binaria

En la siguiente tabla 4 se muestran las variables auxiliares que se utilizarán:

Tabla 4. Variables auxiliares del modelo

Variable	Definición	Tipo
$Z_{jm}$	=1, si alguna parte es asignada al trabajo j-ésimo de la máquina m (si $\sum_i X_{ij} \geq 1$ )	Binaria
$PT_{jm}$	Tiempo de producción del trabajo j-ésimo en la máquina m	Float
$C_{jm}$	Tiempo de finalización del trabajo j-ésimo en la máquina m	Float

$H_{\max_j}$	Máxima altura de cualquier parte del trabajo $j$	Float
$CC_i$	Tiempo de finalización de la parte $i$	Float

El modelo completo sería:

### Modelo

$$\text{Minimizar } \left\{ F3 + \varepsilon \cdot \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} H_{\max_{jm}} \right\} \quad (0)$$

La función objetivo (0) minimiza el tiempo total ponderado retrasos respecto a las fechas de entrega de cada parte. Los retrasos respecto de la fecha de entrega suponen penalizaciones económicas y estratégicas.

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijmk} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n_g \quad (1)$$

Las restricciones (1) asignan cada parte a un único trabajo en una única máquina usando una única orientación

$$\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} A_{ik} \cdot X_{ijmk} \leq MA_m \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (2)$$

Las restricciones (2) limitan el espacio de la superficie total asignada de cada trabajo en cada máquina.

$$\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijmk} \leq n_g \cdot Z_{jm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (3)$$

En las restricciones (3) se indican que si  $\sum_i X_{ijmk} \geq 1$ , entonces  $Z_{jm}=1$ , es decir, si una estructura no se usa en una máquina, no se le asignan partes

$$\sum_{k=1}^{n_o(i)} H_{ik} \cdot X_{ijmk} \leq H_{\max_{jm}} \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (4)$$

En las restricciones (4) se obtendría el valor de las alturas máximas de cada estructura en cada máquina junto con la función objetivo

$$H_{\max_{jm}} \leq MH_m \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (5)$$

Las restricciones (5) limitan la altura de los trabajos en cada máquina.

$$\sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} Z_{jm} \leq n_b \quad (6)$$

. La restricción (6) limita el número total de trabajos a realizar entre todas las máquinas

$$\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{i,j+1,m,k} \leq n_g \cdot \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijmk} \quad \forall j = 1, \dots, n_b - 1; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (7)$$

Las restricciones (7) obligan a que, si una estructura no se realiza en una máquina, entonces las siguientes tampoco (orden incremental de trabajos en cada máquina).

$$PT_{jm} = SET_m \cdot Z_{jm} + VT_m \cdot \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} V_i \cdot X_{ijmk} + HT_m \cdot Hmax_{jm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (8)$$

En las restricciones (8) se calculan los tiempos de procesamiento de cada trabajo en cada máquina

$$PT_{1m} \leq C_{1m} \quad \forall m = 1, \dots, n_m \quad (9a)$$

$$C_{j-1,m} + PT_{jm} \leq C_{jm} \quad \forall j = 2, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (9b)$$

Las restricciones (9a y 9b) indican que en cada máquina el tiempo de finalización de un trabajo será posterior a la finalización del anterior más el tiempo de producción del trabajo, para secuenciar los trabajos en las máquinas.

$$F3 = \sum_{i=1}^{n_g} TARD_i \quad (10)$$

En la restricción (10) se calcula el tiempo total ponderado de retrasos (F3).

$$CC_i - DD_i \leq TARD_i \quad \forall i = 1, \dots, n_g \quad (11)$$

En las restricciones (11) se obtienen los retrasos de cada parte respecto a las fechas de entrega.

$$CC_i \leq C_{jm} + UB \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijmk}\right) \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (12a)$$

$$CC_i \geq C_{jm} - UB \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijmk}\right) \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (12b)$$

las fechas de finalización de cada parte se obtiene en las restricciones (12a) y (12b) a partir de las fechas de finalización de cada trabajo  $C_{jm}$ , de las variables  $X_{ijmk}$  que indican si una parte  $i$  se asigna a en un trabajo  $j$  y del UB (límite superior o upper bound).

$$CC_i - PT_{jm} \geq RD_i - UB \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijmk}\right) \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (13)$$

las restricciones (13) para cumplir con las fechas de disponibilidad de cada parte. Estas restricciones se podían haber incorporado a los modelos “AM-Cost” y “AM-Makespan” si existieran fechas de disponibilidad.

*NOTA:* Las restricciones (6) y (7) no son necesarias para obtener la solución óptima del problema. Y la expresión  $\left\{ \varepsilon \cdot \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} Hmax_{jm} \right\}$  en la función objetivo se puede eliminar para obtener el valor óptimo de los retrasos (F3) y la solución en las variables de decisión ( $X_{ijmk}$ ).

## 4 MÉTODO DE RESOLUCIÓN

---

La optimización de la planificación de la producción en fabricación aditiva (AM) presenta desafíos únicos, especialmente cuando se trata de la asignación eficiente de piezas a trabajos y máquinas. En este capítulo, en el apartado 4.1, se define una heurística de construcción semiparalela adaptada de la heurística de Paraskevopoulos et al. (2008) para problemas de rutas de vehículos (VRP), ya que es la que usaremos para resolver nuestros problemas en estudio. Esta adaptación está diseñada específicamente para abordar las particularidades de la planificación en AM, mejorando la agrupación de piezas y la asignación de trabajos a las máquinas. En el apartado 4.2, se definirá el algoritmo 2D Nesting usado en este trabajo, el algoritmo descrito es una variación de los algoritmos de "Strip Packing" o "Guillotine Cutting", utilizando una heurística basada en el tamaño de las partes y la optimización iterativa del espacio disponible.

### 4.1 Heurística de construcción semiparalela

#### 4.1.1 Introducción

La heurística propuesta en este trabajo se basa en la heurística de construcción semiparalela propuesta por Paraskevopoulos et al. (2008) para problemas VRP que se ha adaptado a las características de los problemas de planificación de la producción en AM.

La agrupación eficaz de piezas en trabajos (jobs) a realizar en una máquina es muy importante en los problemas de planificación de la producción para AM. Los enfoques secuenciales puros, que tratan de asignar cada pieza a un único trabajo en cada iteración para la construcción de los trabajos en las máquinas, no siempre son apropiados, ya que la elección del mejor trabajo de una máquina en particular no puede considerarse explícitamente. En este estudio, se va a adoptar un marco paralelo considerando que todas las partes no asignadas en sus diferentes orientaciones son candidatas para ser insertadas en cada una de las máquinas, generando de forma simultánea un trabajo por cada máquina.

Por tanto, en cada iteración del mecanismo de construcción se consideran todas las orientaciones disponibles, y todas las piezas sin asignar son candidatas para insertar en todas las máquinas. El primer paso consiste en la

Inicialización de trabajos con un “seed”, que se corresponde a la selección de la primera pieza y orientación a fabricar en el trabajo, y que se basará en un cierto criterio de inicialización cumpliendo con las especificaciones de la máquina y de las piezas. El segundo paso consiste en la Construcción de trabajos, es decir, la iterativa selección de las siguientes piezas y sus orientaciones que se fabricarán en cada trabajo y que se basarán en los valores de una función “greedy”. Esta función “greedy” estará formada por varias métricas diferentes que miden la relativa importancia de introducir una pieza en una determinada orientación en un trabajo de una máquina respecto a la función objetivo del problema a estudiar. Como resultado, durante la construcción de los trabajos de las máquinas de manera semiparalela, se permite la duplicación de piezas en distintas máquinas.

El último paso consiste en la Selección del trabajo específico de una máquina AM de entre los generados en paralelo, garantizando así que cada pieza sea fabricada una única vez. El trabajo seleccionado se basará en la función objetivo del problema a estudiar y se agregará a la solución parcialmente construida. Luego, se eliminan las piezas asignadas y se repite el procedimiento general con el primer paso de Inicialización de los trabajos en cada máquina. El procedimiento general finalizará cuando todas las piezas estén asignadas a trabajos. Este esquema es muy similar al descrito en el trabajo de Li et al. (2017), pero introduciendo diferencias en los pasos de construcción de trabajos y de selección del mejor trabajo. La heurística propuesta se describe en los siguientes pasos.

Empezaremos describiendo la construcción de trabajos, porque en este apartado se introduce el concepto de la función “greedy” de forma extensa y será utilizada también en la inicialización de trabajo.

#### 4.1.2 Construcción de trabajos

En la fase de construcción de trabajos, cada pieza candidata a insertarse del conjunto de piezas no asignadas se evalúa en todas las orientaciones posibles para ser asignado al trabajo utilizando una función "greedy". El concepto de función “greedy” se ha utilizado ampliamente en el marco de los VRP y se ha adaptado en este estudio para resolver problemas de planificación de producción en AM. Por lo tanto, la función "greedy" de nuestra heurística de construcción utiliza un conjunto de métricas con la idea de cumplir con las restricciones de nuestro problema y minimizar el valor de la función objetivo. Las métricas evalúan el impacto negativo de insertar piezas no asignadas en una orientación específica en trabajos parcialmente construidos en términos de volumen, altura, área ocupada o incremento de la función objetivo. La mejor inserción está determinada por una combinación de ponderaciones de estas métricas. Así, la pieza con un valor mínimo de la función “greedy” se asigna en la orientación especificada al trabajo parcialmente construido y el procedimiento se repite hasta que no se pueda insertar ninguna pieza en ninguna orientación del trabajo. Este procedimiento fomenta la construcción eficiente de los trabajos y a minimizar el valor de la función objetivo. El proceso se repite para construir un nuevo trabajo temporal en cada máquina, incluyendo en dicha construcción aquellas piezas asignadas temporalmente también a otros trabajos temporales.

La función “greedy” ( $\phi$ ) que mide el impacto de insertar una pieza  $i$  con una orientación específica  $k$  en un trabajo parcialmente construido  $j$  de una máquina  $m$  se expresa en la ecuación (1) donde los pesos ponderados  $\alpha$  definen la contribución relativa de cada métrica a la selección general. Los pesos son valores no negativos cuya suma es igual a uno.

$$\phi_{ikjm}^{\square} = \alpha_1 * C_{ikjm}^1 + \alpha_2 * C_{ikjm}^2 + \alpha_3 * C_{ikjm}^3 + \alpha_4 * C_{ikjm}^4 \quad (1)$$

La primera métrica (2) da prioridad a la inserción de piezas en orientaciones que minimizan el área de producción ocupada de la plataforma de construcción de la máquina AM seleccionada. Así,  $MA_m$  representa el área de producción máxima de la máquina  $m$  y  $A_{ik}$  representa el área de producción ocupada de la pieza  $i$  con orientación  $k$ .

$$C_{ikm}^1 = \frac{A_{ik}}{MA_m} \quad (2)$$

Similarmente, la métrica (3) da prioridad a la inserción de piezas de mayores volúmenes.  $Vmax_m$  representa el volumen máximo de material que puede procesar la máquina  $m$ . Se calcula como el producto de  $MA_m$  por  $Hmax_m$ .  $V_{jm}$  indica el volumen total de material asignado del trabajo parcialmente construido y  $V_i$  es el volumen de material de la pieza a insertar.

$$C_{ijm}^2 = \frac{Vmax_m - V_{jm} - V_i}{Vmax_m} \quad (3)$$

Por otro lado, la métrica (4) da prioridad a la inserción de piezas en orientaciones que no aumenten la altura máxima del trabajo parcialmente construido. Tenga en cuenta que el valor de esta métrica solo se considerará cuando la altura de la pieza a insertar en una orientación específica ( $H_{ik}$ ) sea mayor que la altura máxima actual del trabajo ( $Hmax_{jm} = \max_{\{i,k\} \in J(j)} H_{ik}$ ). Se calcula un valor adimensional dividiendo por la altura de la plataforma de construcción de su máquina relacionada ( $Hmax_m$ ).

$$C_{ikjm}^3 = \frac{\max\{0; H_{ik} - Hmax_{jm}\}}{Hmax_m} \quad (4)$$

Finalmente, la última métrica  $C_{ikjm}^4$  mide el impacto relativo obtenido con respecto a la función objetivo del problema después de la inserción de la pieza  $i$  en una orientación específica  $k$  en el trabajo  $j$  de la máquina  $m$ . Dependiendo de la función objetivo a utilizar, esta métrica se expresa de diferente forma:

#### A) Función objetivo: minimizar el coste total de producción de los trabajos (JPC)

El coste de producción de un trabajo  $j$  en una máquina  $m$  ( $JPC_{jm}$ ) se calcula a través de la Ecuación (5).

$$JPC_{jm} = SET_m \cdot HC + (VT_m \cdot TC_m + MC) \cdot \sum_{i \in J(j)} V_i + HT_m \cdot TC_m \cdot \max_{\{i,k\} \in J(j)} H_{ik} \quad (5)$$

Así, la métrica (6) mide la diferencia relativa obtenida con respecto al coste de producción del trabajo antes ( $JPC_{jm}$ ) y después ( $JPC_{jm(+ik)}$ ) de la inserción de la pieza  $i$  con una orientación específica  $k$  en el trabajo  $j$  de la máquina  $m$ .

$$C_{ikjm}^4 = \frac{JPC_{jm(+ik)} - JPC_{jm}}{JPC_{jm}} \quad (6)$$

Así, la función “greedy” para la función objetivo de minimizar el coste total de producción de los trabajos viene expresada en la Ecuación (7).

$$\Phi_{ikjm}^{(A)} = \alpha_1 * \frac{A_{ik}}{MA_m} + \alpha_2 * \frac{Vmax_m - V_{jm} - V_i}{Vmax_m} + \alpha_3 * \frac{\max\{0; H_{ik} - Hmax_{jm}\}}{Hmax_m} + \quad (7)$$



$$\alpha_4 * \frac{JPC_{jm(+ik)} - JPC_{jm}}{JPC_{jm}}$$

**B) Función objetivo: minimizar el tiempo total de finalización (Makespan)**

El *makespan* es la cantidad de tiempo requerido para procesar todos los trabajos en las máquinas asignadas. Por tanto, en esta fase de construcción de trabajos, la métrica  $C_{ikjm}^4$  mide el impacto relativo en el Tiempo de Procesamiento de un trabajo  $j$  en una máquina  $m$  antes ( $PT_{jm}$ ) y después ( $PT_{jm(+ik)}$ ) de la inserción de la pieza  $i$  con una orientación específica  $k$ .

El tiempo de procesamiento  $PT_{jm}$  de un trabajo  $j$  en una máquina  $m$  se calcula mediante la ecuación (8).

$$PT_{jm} = SET_m + VT_m \cdot \sum_{i \in J(j)} V_i + HT_m \cdot \max_{\{i,k\} \in J(j)} H_{ik} \quad (8)$$

La métrica (9) es la que se usa para esta función objetivo.

$$C_{ikjm}^4 = \frac{PT_{jm(+ik)} - PT_{jm}}{PT_{jm}} \quad (9)$$

Así, la función “greedy” para la función objetivo de minimizar el tiempo total de finalización (*Makespan*) viene expresada en la Ecuación (10).

$$\Phi_{ikjm}^{(B)} = \alpha_1 * \frac{A_{ik}}{MA_m} + \alpha_2 * \frac{Vmax_m - V_{jm} - V_i}{Vmax_m} + \alpha_3 * \frac{\max\{0; H_{ik} - Hmax_{jm}\}}{Hmax_m} + \alpha_4 * \frac{PT_{jm(+ik)} - PT_{jm}}{PT_{jm}} \quad (10)$$

**C) Función objetivo: minimizar el retraso total**

El retraso total es la cantidad de tiempo acumulado de retraso al terminar cada pieza después de su fecha de vencimiento considerando la fecha de finalización del trabajo asignada a cada pieza. Luego, en esta fase de construcción de trabajos, la métrica debe medir el impacto relacionado con el retraso total de las piezas de un trabajo  $j$  en una máquina  $m$  antes ( $JT_{jm}$ ) y después ( $JT_{jm(+ik)}$ ) de la inserción de la pieza  $i$  en una orientación específica  $k$ . También deben ser consideradas la fecha de vencimiento de la pieza  $i$  ( $DD_i$ ) y la fecha de disponibilidad de la pieza  $i$  ( $RD_i$ ).

El retraso total  $JT_{jm}$  de las piezas de un trabajo  $j$  en una máquina  $m$  se calcula mediante la ecuación (11), donde  $DD_i$  es la fecha de vencimiento de la pieza  $i$ , y  $CT_{jm}$  se expresa en la Ecuación (12) como el tiempo de finalización del trabajo  $j$  en la máquina  $m$ , es decir, la suma del tiempo de inicio del trabajo  $j$  en la máquina  $m$  ( $ST_{jm}$ ) y del procesamiento del trabajo  $j$  en la máquina  $m$  ( $PT_{jm}$ ). El tiempo de inicio de un trabajo  $j$  en la máquina  $m$  ( $ST_{jm}$ ) se expresa en la Ecuación (13) como el máximo entre el tiempo de finalización del trabajo precedente en la máquina  $m$  y la mayor fecha de disponibilidad de las piezas del trabajo  $j$ .

$$JT_{jm} = \sum_{i \in J(j)} \max\{0; CT_{jm} - DD_i\} \quad (11)$$

$$CT_{jm} = ST_{jm} + PT_{jm} \quad (12)$$

$$ST_{jm} = \max_{i \in J(j)} \left\{ CT_{j-1,m}; \max_{i \in J(j)} \{RD_i\} \right\} \quad (13)$$

Es importante destacar que la estrategia de construir cada trabajo con la máxima cantidad de piezas es eficiente para los objetivos de minimizar los costes totales y de minimizar el *makespan*, pero no necesariamente es eficiente para la función objetivo de minimizar el retraso total. Una pieza que es urgente es posible que sea interesante fabricarla sola en un trabajo para que se pueda cumplir la fecha de vencimiento si el objetivo es reducir retrasos.

Por ello, se va a definir una estrategia diferente para construir los trabajos y con distintas métricas para la función “greedy” cuando se considere la función objetivo de minimizar el retraso total.

Se va a considerar que se finaliza la construcción de un trabajo  $j$  en la máquina  $m$  cuando asignar una nueva pieza  $i$  suponga un retraso mayor que el retraso antes de asignar dicha pieza al trabajo, es decir, si  $JT_{jm(+ik)}$  (después) es mayor que  $JT_{jm}$  (antes). Esta comprobación no se aplica al inicializar el trabajo  $j$  con la primera pieza  $i$  (*seed*). Con esta estrategia, ya se consideran los retrasos y las métricas se van a basar fundamentalmente en tiempos.

Así, la función “greedy” que se va a aplicar para la función objetivo de minimizar el retraso total viene expresada en la Ecuación (14).

$$\Phi_{ikjm}^{(C)} = \alpha_1 * \frac{A_{ik}}{MA_m} + \alpha_2 * \frac{ST_{jm} - RD_i}{1 + ST_{jm}} + \alpha_3 * \frac{DD_i}{1 + ST_{jm}} + \alpha_4 * \frac{PT_{jm(+ik)} - PT_{jm}}{PT_{jm}} \quad (14)$$

Es importante comentar que, tanto en este paso de construcción como en el siguiente paso de inicialización de los trabajos, hay que comprobar que la pieza a insertar cumple con las restricciones del proceso (Función de Admisibilidad):

- La pieza no supere la altura de la plataforma de construcción de la máquina
- El instante de inicio del trabajo sea mayor o igual a la fecha de disponibilidad de la pieza, y
- La superficie de la pieza entre en el espacio disponible de la plataforma de construcción de la máquina.

Esta última restricción se puede comprobar de 2 formas:

- Considerando que el área de la pieza (largo x ancho) sea menor que el área disponible de la plataforma o bien,
- Considerando que la superficie de cada pieza es un elemento rectangular con ancho y largo, y que la plataforma es un contenedor rectangular, que tienen un ancho y largo conocido, de forma que todas las piezas se asignen al contenedor sin superponerse, con sus bordes paralelos al contenedor. Este problema se corresponde con el 2D Bin Packing, descrito de forma más extensa en el anterior apartado.

### 4.1.3 Inicialización de trabajos

Siguiendo el esquema de inserción genérico de Paraskevopoulos et al. (2008), inicialmente se debe determinar una pieza “semilla” (seed) para empezar a construir cada posible trabajo en cada máquina. El trabajo que se construya para una máquina de fabricación aditiva depende en gran medida de esta decisión.

#### **A) Función objetivo: minimizar el coste total de producción de los trabajos (JPC)**

Basada en la experiencia al minimizar costes, la pieza factible con mayor volumen es el criterio con mejor rendimiento para ser asignada como primera pieza a un trabajo en una máquina. Nótese que la dificultad de agrupar piezas en un mismo trabajo aumenta a medida que las piezas presentan mayores volúmenes. Este criterio es eficiente para minimizar costes y cuando no se consideran fechas de disponibilidad ni fechas de entregas de las piezas a fabricar.

La orientación finalmente seleccionada de la pieza “seed” dependerá del valor obtenido por la función “greedy” mostrada en la ecuación (1) en función de los coeficientes de ponderación considerados en el problema.

#### **B) Función objetivo: minimizar el tiempo total de finalización (Makespan)**

Si el problema considera fechas de disponibilidad en las piezas ( $RD_i$ ) y el criterio se basa en minimizar la fecha de finalización de elaboración de la última pieza (makespan), entonces es interesante adelantar en el tiempo la construcción de los trabajos. . Por ello, al igual que en el anterior caso, la pieza “seed” y su orientación vendrá determinada por el valor de la función “greedy” de las piezas que estén disponibles en el momento de elaborar un job. (aquellas piezas que cumplen que su  $RD_i$  es inferior al instante de comienzo del trabajo  $j$  en la máquina  $m$  ( $ST_{jm}$ ). En el caso de que ninguna pieza estuviera disponible en ese momento, se elegirá la pieza con menor  $RD_i$  entre las piezas factibles no asignadas con la orientación que determine la función “greedy”, retrasando el valor del  $ST_{jm}$  al instante  $RD_{seed}$ .

#### **C) Función objetivo: minimizar el retraso total**

Finalmente, si el problema considera fechas de entrega en las piezas ( $DD_i$ ) con el objetivo de minimizar el retraso total cometido en la planificación, entonces la pieza “seed” de cada trabajo dependerá de factores como las fechas de disponibilidad y entrega de las piezas ( $RD_i$ ,  $DD_i$ ), el instante de comienzo del trabajo  $j$  en la máquina  $m$  ( $ST_{jm}$ ) o el tiempo de procesamiento de la pieza  $i$  con orientación  $k$  en la máquina  $m$  ( $TP_{ikm}$ ). El objetivo es priorizar, por una parte, la inserción de piezas con un  $DD_i$  menor (independiente del tiempo de procesado de la pieza) y por otra, priorizar inserciones de piezas que acerquen el tiempo de producción de la máquina al  $DD_i$ , provocando el menor retraso posible. Por ello, se utilizará la expresión de la ecuación 14, que dará prioridad según los coeficientes de ponderación del problema a resolver:

$$\Phi_{ikjm}^{(inic)} = +\alpha_3 * \frac{DD_i}{1 + ST_{jm}} + \alpha_4 * \left\{ |DD_i - TP_{ikm} - ST_{jm}| + \max\{0, RD_i - ST_{jm}\} \right\} \quad (14)$$

#### 4.1.4 Selección del trabajo

En la fase de Construcción de Trabajos se prepara un trabajo por cada máquina AM con las piezas no programadas y seleccionando la orientación más adecuada de dichas piezas. En esta fase de Selección del Trabajo, se elegirá de entre todos los trabajos construidos, el trabajo  $j$  a fabricar en la máquina  $m$  más efectivo con menor valor de la Función Objetivo Actual (*Current Objective Function*,  $COF_{jm}$ ). Dicho valor se calculará dependiendo de la función objetivo a analizar.

##### **A) Función objetivo: minimizar el coste total de producción de los trabajos (JPC)**

La planificación de la producción de varias piezas en AM supone que cada pieza se produce exactamente una vez por una máquina AM en un trabajo. Basándonos en este supuesto, un criterio de coste efectivo para seleccionar el mejor trabajo  $j$  producido en cada iteración en la máquina asignada  $m$  ( $COF_{jm}$ ) se basa en minimizar el Costo Promedio Actual por unidad de volumen de material ( $CAC_{jm}$ ), ya que se alcanza una utilización más eficiente de la capacidad de la máquina AM. Este enfoque se presenta en la ecuación (15) y también ha sido adoptado en la heurística propuesta por Li et al. (2017). Además, también se han utilizado variantes de este criterio en otras áreas de investigación (ver, por ejemplo, Paraskevopoulos et al. 2008).

$$CAC_{jm} = \frac{JPC_{jm}}{\sum_{i \in J(j)} V_i} \quad (15)$$

##### **B) Función objetivo: minimizar el tiempo total de finalización (Makespan)**

Un criterio eficiente basado en tiempos para seleccionar en cada iteración el mejor trabajo  $j$  fabricado en la máquina asignada  $m$  ( $COF_{jm}$ ) se basa en minimizar el Tiempo de finalización ( $CT_{jm}$ ) presentado en la ecuación (12).

##### **C) Función objetivo: minimizar el retraso total**

Un criterio eficiente basado en retrasos para seleccionar en cada iteración el mejor trabajo  $j$  fabricado en la máquina asignada  $m$  ( $COF_{jm}$ ) se basa en minimizar los Retrasos totales de cada trabajo ( $JT_{jm}$ ) presentado en la ecuación (11).

Pseudocódigo del algoritmo

**Heurística de construcción semi-paralela ( $\alpha_1$  rango,  $\alpha_2$  rango,  $\alpha_3$  rango,  $\alpha_4$  rango)**

Data: Initialize available AM machine lists  $M_m, m=1,2,\dots, Mmax$ .

Result:  $S$

```
1 MS ← Mejor_Solucion();
2 FOR  $\alpha_1 \in \alpha_1\_rango$  DO:
3  FOR  $\alpha_2 \in \alpha_2\_rango$  DO:
4   FOR  $\alpha_3 \in \alpha_3\_rango$  DO:
5     $\alpha_4 = 1 - \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1$ ;
6   IF ( $\alpha_4 \geq 0$ ) THEN:
7    S ← SolucionInicial(), PLi ← ListaPiezas();
8    WHILE (PLi  $\neq$  0) DO:
9     FOR todas las máquinas  $m$  de  $M_m$  DO:
10       $jm \leftarrow$  InicializaTrabajo( $m$ );  $seed \leftarrow$  BuscaPiezaSemilla(PLi);
11      IF ( $seed \neq 0$ ) THEN:
12       FOR todas las orientaciones  $k$  de  $seed$  DO:
13         $\phi(seed, k, j, m) \leftarrow$  FuncionGreedy( $seed, k, j, m, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ );
14         $\Phi \leftarrow$  AlmacenarMejorPieza( $\phi(seed, k, j, m)$ );
15       ENDFOR
16        $jm \leftarrow$  Insertar( $seed, k, \Phi$ );  $done \leftarrow$  TRUE;
17       WHILE ( $done = TRUE$ ) DO:
18         $done \leftarrow$  FALSE
19        FOR todas las piezas  $i$  de PLi - { $seed$ } DO:
20         FOR todas las orientaciones  $k$  de  $i$  DO:
21           $\phi(i, k, j, m) \leftarrow$  FuncionGreedy( $i, k, j, m, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ );
22          IF ( $(\phi \geq 0)$  AND FunciónAdmisibilidad()) THEN:
23            $\Phi \leftarrow$  AlmacenarMejorPieza( $\phi(i, k, j, m)$ );  $done \leftarrow$  TRUE;
24          ENDIF
25         ENDFOR
26        ENDFOR
27        IF ( $done$ ) THEN:
28          $jm \leftarrow$  InsertarPieza( $i, k, \Phi$ );
29        ENDIF
30        ENDWHILE
31        ENDIF
32        ENDFOR
33        FOR todos los trabajos  $jm$  DO:
```

```

34     COFjm ← FunciónObjetivoActual(jm); jx ← AlmacenarMejorTrabajo(COFjm);
35     ENDFOR
36     S ← InsertarTrabajo(jx); LPi ← EliminarPiezas(jx);
37     ENDWHILE
38     IF f(S) < f(MS) THEN:
39         MS ← S;
40     ENDIF
41     ENDFOR
42     ENDFOR
43     ENDFOR
44     ENDFOR

```

## 4.2 Algoritmo 2D Nesting

El algoritmo implementado en este trabajo tiene como objetivo resolver el problema bidimensional del "Nesting", es decir, comprobar si un conjunto de piezas caracterizadas por las dimensiones (ancho y largo) de su área proyectada pueden ser asignadas a un job de una máquina. El problema determinará la ubicación y posición de cada una de las piezas dentro del job que se caracteriza igualmente por las dimensiones de ancho y largo.

En la siguiente ilustración se muestra un ejemplo de una pieza y de un job, mostrando sus dimensiones (ancho y largo):

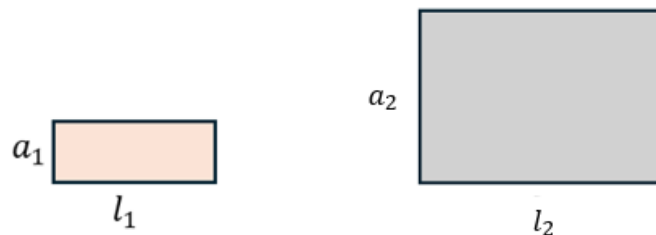


Ilustración 13. Ejemplo de una pieza y un job

Este algoritmo puede clasificarse como un algoritmo de "Strip Packing" con heurística de "First-Fit Decreasing Height" (FFDH). Da prioridad a la inserción de las piezas con mayores áreas proyectadas por lo que en cada iteración, ordenará tanto las partes, como los espacios resultantes de mayor a menor.

Se va a definir el algoritmo dividiéndolo en dos grandes pasos:

### Paso 1: Inicialización y elección de la pieza semilla

El algoritmo se inicializa ordenando las piezas y los huecos (inicialmente sólo hay un hueco coincidente con las dimensiones del job) de mayor a menor área proyectada, la cual se calcula multiplicando el ancho por el largo ( $\text{área} = a * l$ ). Una vez estén las piezas ordenadas, se elige la pieza con mayor área, esta pieza será nuestra pieza semilla o “seed”, ya que a partir de ella empezamos a construir la solución. A continuación, se prueba a introducir la pieza en el job (ubicándola en la parte inferior izquierda, que sería la posición (0,0), como se muestra en la figura de la izquierda en la ilustración 14), si la pieza cabe, se elimina del listado de piezas disponibles y pasamos al segundo paso.

Con el propósito de mejorar el empaquetamiento, si la pieza tal y como está definida no cabe en el job, se procede a girar la pieza intercambiando los valores de ancho y largo (la orientación no cambia, es la misma) y se vuelve a comprobar la admisibilidad.

Se muestra un ejemplo de la importancia de girar la pieza en la siguiente imagen:

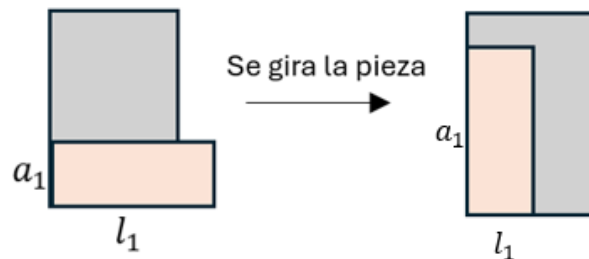


Ilustración 14. Giro de una pieza

Si como ha sucedido en la imagen, al girar la pieza ésta es ubicada en el job, se elimina del listado y se pasa al siguiente paso, si por el contrario sigue sin caber, el algoritmo termina aquí y no habría solución.

### Paso 2: Desarrollo del algoritmo

Una vez introducida la pieza en el Job en la esquina inferior izquierda, se realiza un “Corte Guillotina horizontal” trazando una línea horizontal desde la esquina superior de la pieza hasta el borde derecho del job. Después de hacer esto, tendremos el espacio no ocupado del job dividido en 2 huecos (los llamaremos E1 Y E2):

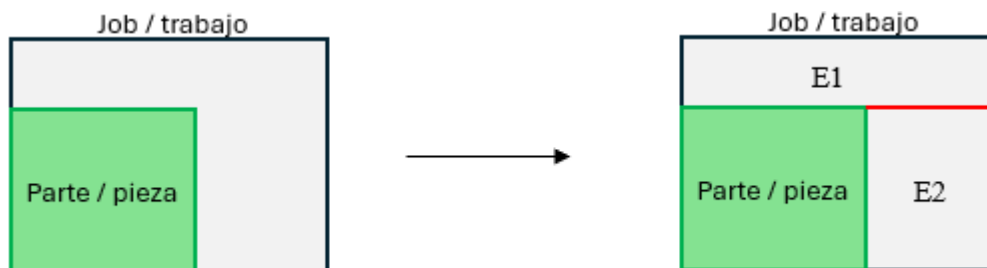


Ilustración 15. Corte Guillotina horizontal del algoritmo 2D Nesting

Ahora lo que hará el algoritmo será incluir estos dos nuevos espacios que han surgido al introducir la pieza al listado de espacios y reordenarlos como anteriormente mayor a menor área. Seguidamente, el algoritmo repetirá los pasos 1 y 2 continuando con la siguiente pieza de mayor área proyectada y comprobando la inserción en todos los huecos disponibles. El algoritmo finalizará cuando alguna pieza no puede ser ubicada en ningún hueco disponible (devolviendo false) o cuando todas las piezas pueden ser ubicadas en el job (devolviendo true).

Por último, se muestra un ejemplo de cómo podría quedar cerrado un job:



Ilustración 16. Ejemplo final job

Con el objetivo de obtener una visualización conceptual del algoritmo, se adjunta el siguiente diagrama de flujo:

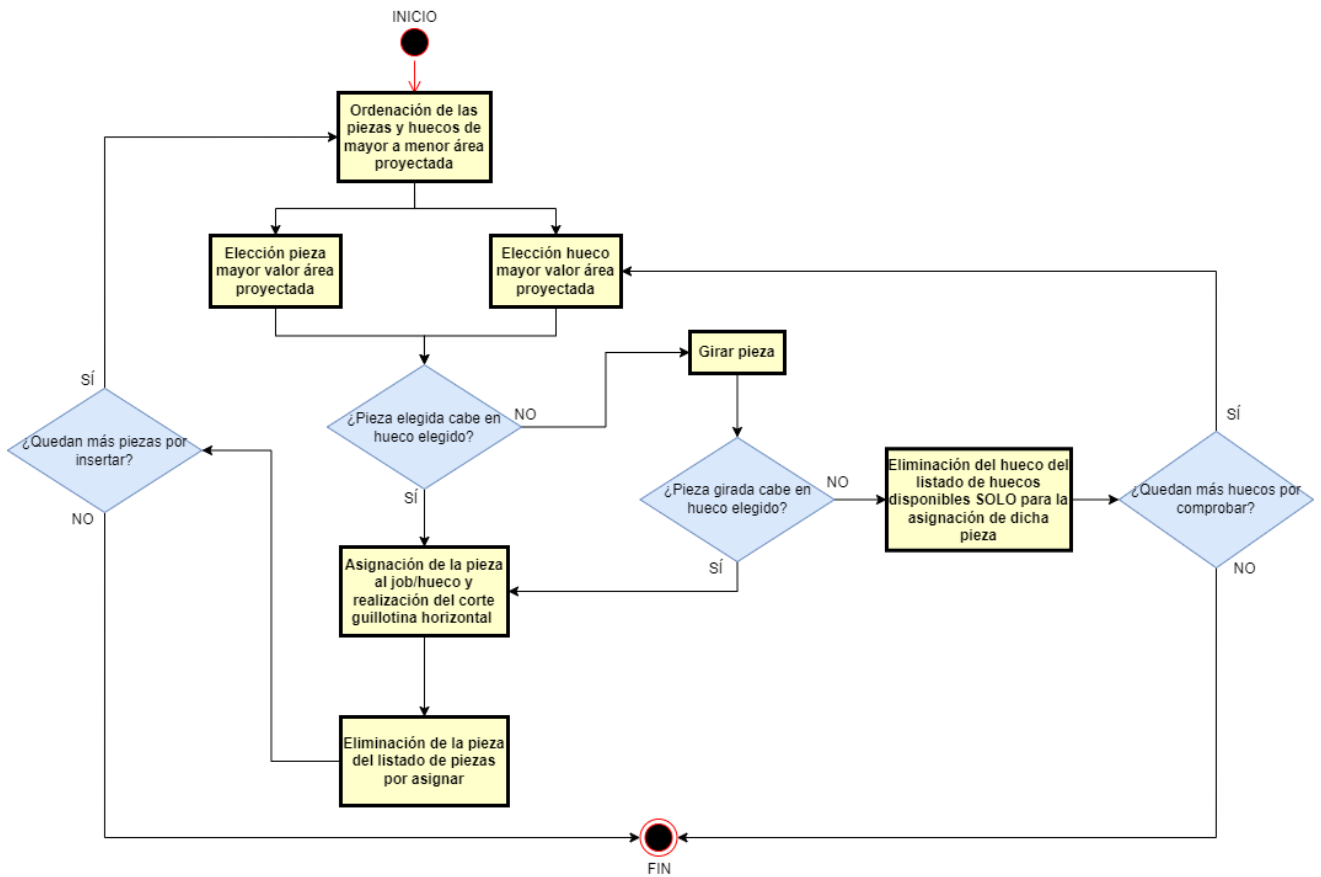


Ilustración 17. Diagrama de Flujo del Algoritmo 2D Nesting



# 5 EXPERIMENTACIÓN

---

En este apartado se describe la experimentación, se muestran los resultados de todos los experimentos (un total de 360) y se comparan los resultados obtenidos.

Se van a usar como punto de partida las 20 instancias de (Kucukkoc, 2021), que se ampliarán con información adicional de costes, y con nuevas instancias para 2 y 3 orientaciones. La heurística de construcción semiparalela definida en el anterior apartado de forma extensa se ha desarrollado en C++, donde se integrará el algoritmo de 2D Bin Packing también explicado en el apartado anterior. Se resolverán las instancias con tres funciones objetivos (minimizar *Makespan*, minimizar *Total Tardiness* y minimizar *Total Costs*), en todos los casos considerando y sin considerar el algoritmo 2D Bin Packing, es decir, aceptando válido si el área ocupada no supere el área máxima de cada máquina.

## 5.1 Generación de instancias

La generación de nuevas instancias para la experimentación del problema abordado tiene su origen en las 20 instancias presentadas en Kucukkoc, Li, & Tang (2021), que tienen como información: las fechas de entrega y fechas de disponibilidad de cada pieza, la geometría de cada pieza (alto, ancho y largo) de una única orientación, su volumen, y la información de cada máquina relacionada con tiempos. Cada instancia está compuesta por entre 12 y 40 piezas, utilizando 2 tipos de máquinas y un número fijo máximo de trabajos y máquinas por instancia.

Como podemos observar en la tabla 5, el número de piezas y máquinas va aumentando a la vez que aumentan las instancias, incrementando así su complejidad para ser ejecutadas y resueltas.

Tabla 5. Instancias de Kucukkoc et al. (2021)

Test instance	nbParts	nbMachines	Range of parts	Machines
I1	12	2	P1–P12	M1[1], M2[1]
I2	12	2	P13–P24	M1[1], M2[1]
I3	14	2	P1–P14	M1[1], M2[1]
I4	14	2	P15–P28	M1[1], M2[1]
I5	14	3	P1–P14	M1[1], M2[2]
I6	14	3	P15–P28	M1[2], M2[1]
I7	18	2	P1–P18	M1[1], M2[1]
I8	18	2	P11–P28	M1[1], M2[1]
I9	18	2	P15–P32	M1[1], M2[1]
I10	18	3	P19–P36	M1[2], M2[1]
I11	24	3	P1–P24	M1[2], M2[1]
I12	24	3	P1–P24	M1[1], M2[2]
I13	24	4	P17–P40	M1[2], M2[2]
I14	24	5	P17–P40	M1[3], M2[2]
I15	30	5	P1–P30	M1[3], M2[2]
I16	30	6	P1–P30	M1[3], M2[3]
I17	30	7	P11–P40	M1[4], M2[3]
I18	30	8	P11–P40	M1[4], M2[4]
I19	40	11	P1–P40	M1[6], M2[5]
I20	40	12	P1–P40	M1[6], M2[6]

Los datos de estas instancias se ampliarán añadiendo la siguiente información:

- Costes unitarios de cada máquina, basado en datos de Li, Kucukkoc, & Zhang (2017) para poder llevar a cabo la minimización de costes, un aspecto bastante importante para las empresas.
- Orientaciones alternativas (2 y 3 orientaciones) simplemente rotando el ancho, largo y alto, como si se tratara de un prisma. De este modo, tendremos 60 instancias para experimentar (20 instancias iniciales x 3 orientaciones alternativas), que irán aumentando en dificultad computacional debido al aumento progresivo de piezas y orientaciones.

Las 20 instancias (I1-I20) originales con toda la información requerida, añadiendo costes se pueden ver en el Anexo 1. Estas instancias originales tienen una única orientación por cada pieza.

La incorporación de orientaciones alternativas en las piezas de las instancias sigue la siguiente metodología. La primera orientación proviene de los datos recogidos del artículo de Kucukkoc et al. (2021) con información de Altura, Ancho, Largo y Superficie (la Superficie es el Ancho x Largo). La segunda orientación se basa en rotar la primera orientación usando como Altura el Ancho inicial, como Ancho el Largo inicial y como Largo la Altura inicial. La tercera orientación se obtiene aplicando el mismo proceso anterior, pero usando como Altura el Largo inicial, como Ancho la Altura inicial y como Largo el Ancho inicial. La Tabla 6 muestra un ejemplo de las 3 orientaciones de la primera pieza de la instancia I1.

Las instancias con una única orientación (1O) usan únicamente la orientación 1 inicial de cada pieza. Las instancias con dos orientaciones (2O) usan las orientaciones 1 y 2 de cada pieza. Finalmente las instancias con tres orientaciones (3O) usan las tres orientaciones generadas de cada pieza.

Tabla 6. Ejemplo de la generación de las 3 orientaciones de la pieza 1 de la instancia I1

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
1	2	18.80	267.20	16.00	16.70
1	3	16.00	314.00	16.70	18.80

Asimismo, estas 60 instancias generadas se van a ejecutar para 3 funciones objetivos diferentes (Minimizar *Makespan*, Minimizar *Total Costs* y Minimizar *Total Tardiness*), lo que resulta en un total de 180 experimentos. Estos 180 experimentos se ejecutarán utilizando tanto el algoritmo 2D Bin Packing como sin usarlo, asegurando simplemente que el área ocupada no supere el área máxima de cada máquina. En total, se realizarán 360 experimentos (180 2D Bin Packing + 180 sin 2D Bin Packing).

Los ficheros de datos de entrada del problema contienen información de las orientaciones de cada pieza y de las características específicas de cada máquina. Los ficheros tendrán 4 partes claramente diferenciadas. La primera de ellas contiene la información del número de piezas, número de *jobs* máximos por máquina y número de máquinas. La segunda parte contendrá la información del volumen de las piezas y sus respectivas fechas de entrega y disponibilidad. La tercera aportará los datos de las distintas orientaciones de las piezas. Y concluyendo, la cuarta sección con las características de las máquinas utilizadas.

A continuación, se aporta la estructura de fichero de entrada de datos con extensión “.AMO” con la información de las piezas y las máquinas. Se muestran como ejemplo los datos de la instancia 1 (I1) con 3 orientaciones, que tendrá el nombre de “I1\_3.amo”.

```
Número parts :
12
Número jobs máximo :
5
Número máquinas :
2
```

Ilustración 18. Primera parte fichero datos de entrada (Sección inicial)

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	3	1573.80	6.25	305.90	P1
2	3	421.30	7.35	282.18	P2
3	3	147.80	9.83	378.25	P3
4	3	285.20	20.95	214.67	P4
5	3	583.30	36.58	148.98	P5
6	3	3282.50	51.50	576.18	P6
7	3	1265.50	56.35	240.42	P7
8	3	723.30	69.90	211.63	P8
9	3	278.50	75.07	330.87	P9
10	3	1051.80	86.00	387.98	P10
11	3	201.90	93.03	447.13	P11
12	3	866.10	93.10	445.10	P12

Ilustración 19. Segunda parte fichero datos de entrada (Volumen y fechas piezas)

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
1	2	18.80	267.20	16.00	16.70
1	3	16.00	314.00	16.70	18.80
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
2	2	6.70	200.60	22.80	8.80
2	3	22.80	59.00	8.80	6.70
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
3	2	9.30	42.60	2.10	20.30
3	3	2.10	188.80	20.30	9.30
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
4	2	21.60	28.90	3.90	7.40
4	3	3.90	159.80	7.40	21.60
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
5	2	14.90	111.90	4.10	27.30
5	3	4.10	406.80	27.30	14.90
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
6	2	23.20	332.80	12.90	25.80
6	3	12.90	598.60	25.80	23.20
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
7	2	22.20	97.20	6.70	14.50
7	3	6.70	321.90	14.50	22.20
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
8	2	24.60	53.60	15.30	3.50
8	3	15.30	86.10	3.50	24.60
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
9	2	20.50	20.40	1.00	20.40
9	3	1.00	418.20	20.40	20.50
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
10	2	6.80	312.20	13.40	23.30
10	3	13.40	158.40	23.30	6.80
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
11	2	4.00	131.50	5.00	26.30
11	3	5.00	105.20	26.30	4.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
12	2	5.90	268.80	21.00	12.80
12	3	21.00	75.50	12.80	5.90

Ilustración 20. Tercera parte fichero entrada de datos (Características piezas)

mach.	TC(1 / VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo		
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

Ilustración 21. Cuarta parte fichero entrada de datos (Características máquinas)

## 5.2 Experimentación y análisis de resultados

En este apartado, se resuelven las 60 instancias con tres funciones objetivos (Minimizar *Makespan*, Minimizar *Total Tardiness*, y Minimizar *Total Costs*) y con/sin *2D Bin Packing*. En total serían  $60 \cdot 3 \cdot 2 = 360$  experimentos. Y posteriormente se realizará un análisis detallado de los resultados, comparándolos entre ellos y con (Kucukkoc et al. 2021) sólo para IO y minimizando el *Total tardiness* que se corresponden con los resultados de ese artículo.

A continuación, se explican los experimentos.

## 5.2.1 Experimentación con 1-orientación

En este apartado se ejecutan 20 experimentos asociados a las 20 instancias con la heurística semiparalela para 1 orientación (1O) con 2D Bin Packing considerando todos los valores de los parámetros alfa, es decir, el algoritmo probará con todos los valores enteros de los cuatro alfa (0-100) y con la función objetivo Minimizar *Total Tardiness*, quedándose con el mejor resultado de cada experimento.

Estos 20 resultados se comparan en la tabla 7 con la mejor solución encontrada en la literatura científica, en concreto en el artículo de Kucukkoc et al. (2021) que usa las mismas 20 instancias que nosotros.

La Tabla 7, muestran los mejores valores de la FO (*Total Tardiness*) alcanzado en cada experimento por cada uno de los 2 métodos comparados. De igual manera ofrece el número de *Jobs* utilizados, el número de partes finalizados con retraso y el valor máximo obtenido en un *job* para alcanzar los valores de la FO obtenidos. Por último, la columna “Diferencia”, muestra la diferencia de los valores obtenidos entre cada método.

Tabla 7. Comparación métodos Min Total Tardiness 1O

Test Instance	Kucukkoc(2021)				Semi-parallel Heuristic				
	N_Jobs	Maximum tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness	N_Jobs	Maximum tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness	Diferencia
I1	5	0,00	0	0,00	5	0,00	0	0,00	0,00
I2	6	57,89	2	66,43	7	32,44	1	32,44	-33,99
I3	6	10,35	2	18,57	7	0,00	0	0,00	-18,57
I4	6	56,58	3	98,55	7	0,00	0	0,00	-98,55
I5	5	0,00	0	0,00	7	0,00	0	0,00	0,00
I6	6	0,00	0	0,00	8	0,00	0	0,00	0,00
I7	8	0,00	0	0,00	9	0,00	0	0,00	0,00
I8	7	135,44	5	335,08	11	220,20	3	296,44	-38,64
I9	8	97,12	7	308,61	10	42,78	2	74,64	-233,97
I10	9	0,00	0	0,00	9	0,00	0	0,00	0,00
I11	9	10,22	1	10,22	12	0,00	0	0,00	-10,22
I12	9	7,54	1	7,54	12	0,00	0	0,00	-7,54
I13	9	114,30	3	213,50	11	0,00	0	0,00	-213,50
I14	10	34,84	2	36,92	12	0,00	0	0,00	-36,92
I15	12	28,19	2	38,36	14	0,00	0	0,00	-38,36
I16	11	26,21	3	58,16	14	0,00	0	0,00	-58,16
I17	13	110,64	5	174,66	16	0,00	0	0,00	-174,66
I18	12	94,06	3	139,80	16	0,00	0	0,00	-139,80
I19	15	62,46	6	148,56	20	0,00	0	0,00	-148,56
I20	15	76,52	3	152,44	20	0,00	0	0,00	-152,44
								Dif. Total	-1403,88

Como se puede apreciar en la tabla 7, el método empleado en este trabajo mejora o iguala el valor de la función objetivo en todas las instancias al método empleado por Kucukkoc et al. (2021), exactamente mejora 15 instancias y en 5 se obtienen los mismos resultados. Esto provoca también una mejoría respecto al número de partes atrasadas, aunque el número de Jobs utilizados en nuestro método es mayor.

## 5.2.2 Experimentación con múltiples orientaciones

En este apartado nos centraremos en la comparación de usos de orientaciones alternativas (2O y 3O) con el objetivo de dar más opciones al método en la colocación de las partes, además de añadir realismo para así

mejorar las soluciones. Para ello, ejecutaremos las 20 instancias comentadas, descritas y utilizadas en el apartado anterior para las tres funciones objetivo (Minimizar *Makespan*, Minimizar *Total Tardiness*, y Minimizar *Total Costs*) considerando 2D Bin Packing y con 1O, 2O y 3O. Así, se ejecutarán un total de 180 experimentos.

- Minimizar Total Tardiness

Como ya vimos en el anterior apartado, nuestro método hoy en día es el que mejores resultados obtiene en la literatura para minimizar el *Total Tardiness* considerando 2D Bin Packing y una sola orientación, aun así en este trabajo se va a ampliar incluyendo la consideración de 2 y 3 orientaciones alternativas.

En la Tabla 8 se comparan las 20 instancias considerando 1O, 2O y 3O, utilizando para ello las mismas columnas que en la Tabla 7:

Tabla 8. Comparación de las 3O para minimizar Total Tardiness

Test Instance	Semi-parallel Heuristic 1O				Semi-parallel Heuristic 2O					Semi-parallel Heuristic 3O					
	N_Jobs	Maximum tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness	N_Jobs	Maximum tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness	Diferencia (2O-1O)	N_Jobs	Maximum tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness	Diferencia (3O-2O)	Diferencia (3O-1O)
I1	5	0,00	0	0,00	5	0,00	0	0,00	0,00	4	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I2	7	32,44	1	32,44	7	26,23	1	26,23	-6,20	8	0,00	0	0,00	-26,23	-32,44
I3	7	0,00	0	0,00	6	0,00	0	0,00	0,00	7	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I4	7	0,00	0	0,00	8	0,00	0	0,00	0,00	9	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I5	7	0,00	0	0,00	7	0,00	0	0,00	0,00	8	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I6	8	0,00	0	0,00	7	0,00	0	0,00	0,00	8	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I7	9	0,00	0	0,00	7	0,00	0	0,00	0,00	8	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I8	11	220,20	3	296,44	9	182,00	2	213,02	-83,42	9	185,40	2	216,02	3,00	-80,42
I9	10	42,78	2	74,64	9	62,81	2	66,63	-8,01	10	31,98	2	40,17	-26,46	-34,47
I10	9	0,00	0	0,00	10	0,00	0	0,00	0,00	11	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I11	12	0,00	0	0,00	11	0,00	0	0,00	0,00	12	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I12	12	0,00	0	0,00	11	0,00	0	0,00	0,00	11	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I13	11	0,00	0	0,00	11	0,00	0	0,00	0,00	12	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I14	12	0,00	0	0,00	11	0,00	0	0,00	0,00	12	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I15	14	0,00	0	0,00	14	0,00	0	0,00	0,00	14	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I16	14	0,00	0	0,00	14	0,00	0	0,00	0,00	15	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I17	16	0,00	0	0,00	17	0,00	0	0,00	0,00	18	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I18	16	0,00	0	0,00	17	0,00	0	0,00	0,00	19	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I19	20	0,00	0	0,00	20	0,00	0	0,00	0,00	22	0,00	0	0,00	0,00	0,00
I20	20	0,00	0	0,00	20	0,00	0	0,00	0,00	22	0,00	0	0,00	0,00	0,00
								Dif. Total	-97,63				Dif. Total	-49,69	-147,32

Como se puede apreciar, a medida que aumentan el número de orientaciones alternativas, los retrasos disminuyen debido a que los problemas 1O están incluidos en los problemas 2O y éstos en los problemas 3O.

Considerando 2O reducimos el valor de la función objetivo respecto a 1O un total de **97,63** unidades de tiempo, considerando 3O respecto a 2O reducimos **49,69** unidades de tiempo y respecto a 1O, un total de **147,32**. En un único experimento se empeora respecto del problema con menos orientaciones. Esta anomalía se debe a que es una heurística, es decir, ofrece en tiempos de computación pequeños soluciones buenas pero no necesariamente óptimas.

- Minimizar Makespan

En este apartado, lo que haremos será cambiar la función objetivo, centrándonos ahora en minimizar el *Makespan* en cada instancia. A continuación, se muestra en la tabla 9 la comparación con el uso de orientaciones alternativas (2O y 3O):

Tabla 9. Comparación de las 3O para minimizar Makespan

Test Instance	Semi-parallel Heuristic 10		Semi-parallel Heuristic 20			Semi-parallel Heuristic 30			
	N_Jobs	Makespan	N_Jobs	Makespan	Diferencia (20-10)	N_Jobs	Makespan	Diferencia (30-20)	Diferencia (30-10)
I1	6	242,47	7	242,47	0,00	5	241,79	-0,68	-0,68
I2	6	559,83	6	559,83	0,00	6	551,73	-8,10	-8,10
I3	7	380,65	8	380,65	0,00	7	388,12	7,47	7,47
I4	8	552,67	7	538,07	-14,60	7	538,07	0,00	-14,60
I5	10	372,17	10	369,06	-3,11	10	386,28	17,22	14,11
I6	8	408,31	9	408,58	0,27	10	415,44	6,86	7,13
I7	8	451,55	8	438,68	-12,87	9	446,91	8,23	-4,64
I8	8	685,28	7	674,98	-10,30	8	683,43	8,45	-1,85
I9	10	858,00	8	853,08	-4,93	8	853,08	0,00	-4,93
I10	9	630,62	8	625,15	-5,47	10	630,73	5,59	0,11
I11	13	480,61	13	480,86	0,25	13	498,27	17,41	17,66
I12	13	479,67	13	480,86	1,19	13	498,27	17,41	18,60
I13	14	623,15	11	622,92	-0,23	14	614,52	-8,40	-8,63
I14	15	611,70	15	612,70	1,00	17	612,80	0,10	1,10
I15	20	401,03	19	393,61	-7,43	18	394,03	0,43	-7,00
I16	21	363,24	19	363,24	0,00	23	362,40	-0,84	-0,84
I17	18	611,70	18	611,70	0,00	21	611,40	-0,30	-0,30
I18	20	611,70	23	611,70	0,00	24	611,40	-0,30	-0,30
I19	36	611,70	32	611,70	0,00	33	611,40	-0,30	-0,30
I20	33	611,70	33	611,70	0,00	34	611,40	-0,30	-0,30
				Dif. Total	-56,23		Dif. Total	69,94	13,72

En este caso, al considerar 2O el *makespan* total disminuye un total de **56,23** unidades de tiempo, pero al considerar 3O respecto a considerar 2 y 1 orientación, el valor del *makespan* total aumenta en **69,94** y **13,72** unidades de tiempo respectivamente.

Como se comentó antes, estos resultados anómalos se debe a que usamos un algoritmo heurístico muy sencillo, por lo que al aumentar el número de orientaciones aumenta el tamaño del problema y el algoritmo no encuentra la solución óptima del problema. Debido a que cuando consideramos 3O incluimos las soluciones tanto de 2O como 1O, si se aplicasen algoritmos óptimos se deberían obtener soluciones como mínimo iguales, es decir obtener un valor  $\leq 0$  en la columna “Diferencia”.

- Minimizar Total Costs

Por último, en la tabla 10 comparamos los resultados de las 20 instancias considerando las 3 orientaciones, pero esta vez minimizando los costes totales, descritos en apartados anteriores.

Tabla 10. Comparación de las 3O para minimizar Total Costs

Test Instance	Semi-parallel Heuristic 10			Semi-parallel Heuristic 20				Semi-parallel Heuristic 30				
	N_Jobs	NºMáquinas usadas	Total Costs	N_Jobs	NºMáquinas usadas	Total Costs	Diferencia (20-10)	N_Jobs	NºMáquinas usadas	Total Costs	Diferencia (30-20)	Diferencia (30-10)
I1	4	1	45157,63	4	1	45121,63	-36,00	3	1	44765,63	-356,00	-392,00
I2	4	1	104363,52	3	1	104115,51	-248,01	3	1	104115,51	0,00	-248,01
I3	5	1	76054,48	4	1	75728,48	-326,00	4	1	75440,47	-288,01	-614,01
I4	5	1	97307,84	4	1	96615,83	-692,01	4	1	96603,83	-12,00	-704,01
I5	5	1	76054,48	4	1	75728,48	-326,00	4	1	75440,47	-288,01	-614,01
I6	5	1	97307,84	4	1	96615,83	-692,01	4	1	96603,83	-12,00	-704,01
I7	5	1	94730,84	4	1	94764,84	33,99	5	1	94238,83	-526,01	-492,02
I8	6	1	132084,47	5	1	131476,47	-608,00	5	1	131374,45	-102,02	-710,02
I9	7	1	172035,55	6	1	171859,53	-176,02	6	1	171457,53	-402,00	-578,02
I10	7	1	168659,31	5	1	167773,31	-886,00	5	1	167767,31	-6,00	-892,00
I11	8	1	148771,11	7	1	148583,14	-187,97	7	1	147905,14	-678,00	-865,97
I12	8	1	148771,11	7	1	148583,14	-187,97	7	1	147905,14	-678,00	-865,97
I13	8	1	191204,92	7	1	190110,91	-1094,02	6	1	190072,92	-37,98	-1132,00
I14	8	1	191204,92	7	1	190110,91	-1094,02	6	1	190072,92	-37,98	-1132,00
I15	9	1	181533,23	9	1	181065,27	-467,97	8	1	180889,27	-176,00	-643,97
I16	9	1	181533,23	9	1	181065,27	-467,97	8	1	180889,27	-176,00	-643,97
I17	10	1	238256,81	9	1	237660,80	-596,02	10	1	237332,83	-327,97	-923,98
I18	10	1	238256,81	9	1	237660,80	-596,02	10	1	237332,83	-327,97	-923,98
I19	13	1	278470,69	11	1	277830,66	-640,03	9	1	277118,63	-712,03	-1352,06
I20	13	1	278470,69	11	1	277830,66	-640,03	9	1	277118,63	-712,03	-1352,06
					Dif. Total	-9928,05			Dif. Total	-5856,00	-15784,05	

Como se puede apreciar, a medida que aumentan el número de orientaciones alternativas, el cote total disminuye en casi todas las instancias del estudio.

Considerando 2O reducimos el valor de la función objetivo respecto a 1O un total de **9.928,05** unidades monetarias, considerando 3O respecto a 2O reducimos **5.856,00** unidades monetarias y respecto a 1O, un total de **15.784,05**. Como ocurría al minimizar *Total Tardiness*, en un único experimento se empeora respecto del problema con menos orientaciones.

### 5.2.3 Experimentación por el uso del 2D Bin Packing

En este apartado nos centraremos en la comparación de usar la técnica 2D Bin Packing (descrita de forma más extensa en apartados anteriores) frente a no usarla para resolver el problema descrito en este trabajo.

Al no usar esta técnica, el algoritmo lo único que realizará para comprobar que un grupo de piezas caben en un *job* de una máquina será sumar el área de cada pieza y comprobar que esta suma sea menor que el área de la máquina dónde van a ser fabricados. De esta manera se intuyen unos resultados mejores que en el apartado anterior pero muchas de las soluciones probablemente no sean admisibles en la realidad.

Para llevar a cabo esta comparación, ejecutaremos las 20 instancias comentadas, descritas y utilizadas en el apartado anterior para las tres funciones objetivo (Minimizar *Makespan*, Minimizar *Total Tardiness*, y Minimizar *Total Costs*), para las 3 orientaciones posibles de las piezas y para todos los valores de los parámetros alfa, quedándose con el mejor resultado de cada experimento, esta vez sin considerar 2D Bin Packing. Así, se ejecutarán un total de 180 experimentos.

- Minimizar Total Tardiness

En la siguiente tabla 11 se compara el uso del 2D Bin Packing minimizando el *Total Tardiness*. Para ello, comparamos el valor de la función objetivo y el número de partes que se entregan con retraso. Además, se añade una columna donde se muestra la diferencia entre el valor de la función objetivo para cada instancia.

Tabla 11. Comparación uso 2D Bin Packing Min Total Tardiness

Test Instance	Semi-parallel Heuristic 10					Semi-parallel Heuristic 20					Semi-parallel Heuristic 30				
	2D Nesting		SIN 2D Nesting		Diferencia	2D Nesting		SIN 2D Nesting		Diferencia	2D Nesting		SIN 2D Nesting		Diferencia
	Nº of late parts	Total Tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness		Nº of late parts	Total Tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness		Nº of late parts	Total Tardiness	Nº of late parts	Total Tardiness	
I1	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I2	1	32,44	1	16,21	-16,22	1	26,23	0	0,00	-26,23	0	0,00	0	0,00	0,00
I3	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I4	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I5	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I6	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I7	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I8	3	296,44	2	190,42	-106,02	2	213,02	1	142,07	-70,95	2	216,02	2	119,62	-96,40
I9	2	74,64	3	43,79	-30,85	2	66,63	0	0,00	-66,63	2	40,17	0	0,00	-40,17
I10	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I11	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I12	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I13	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I14	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I15	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I16	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I17	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I18	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I19	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
I20	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	0,00
				Diff. Total	-153,10				Diff. Total	-163,81				Diff. Total	-136,57

Como se puede apreciar, al no considerar la técnica 2D Bin Packing, el retraso total disminuye o se igualan en



todas las instancias del estudio y también disminuye el número de piezas entregadas con retraso.

Considerando solo una orientación, el valor de la función objetivo disminuye un total de **153,10** unidades de tiempo, considerando 2O se reduce un total de **163,81** unidades de tiempo y **4** piezas entregadas con retraso, y considerando 3O un total de **136,57** y **2** piezas entregadas con retraso.

- Minimizar Makespan

En este apartado se compara el uso del 2D Bin Packing, esta vez minimizando el *Makespan*. Para ello, comparamos el valor de la función objetivo de cada instancia a través de la columna “Diferencia”, donde se refleja la diferencia entre el uso de dicha técnica.

Tabla 12. Comparación uso 2D Bin Packing Min Makespan

Test Instance	Semi-parallel Heuristic 10			Semi-parallel Heuristic 20			Semi-parallel Heuristic 30		
	2D Nesting	SIN 2D Nesting	Diferencia	2D Nesting	SIN 2D Nesting	Diferencia	2D Nesting	SIN 2D Nesting	Diferencia
I1	242,47	254,49	12,02	242,47	247,73	5,26	241,79	223,30	-18,50
I2	559,83	552,57	-7,26	559,83	544,96	-14,87	551,73	542,57	-9,16
I3	380,65	407,38	26,73	380,65	413,11	32,46	388,12	347,51	-40,61
I4	552,67	535,54	-17,13	538,07	530,28	-7,79	538,07	527,98	-10,09
I5	372,17	372,17	0,00	369,06	354,64	-14,41	386,28	341,73	-44,55
I6	408,31	431,70	23,38	408,58	401,48	-7,10	415,44	399,84	-15,60
I7	451,55	434,64	-16,90	438,68	433,41	-5,27	446,91	422,38	-24,52
I8	685,28	678,26	-7,03	674,98	663,52	-11,46	683,43	663,49	-19,94
I9	858,00	848,09	-9,91	853,08	831,68	-21,40	853,08	844,35	-8,72
I10	630,62	627,97	-2,65	625,15	626,55	1,40	630,73	622,07	-8,66
I11	480,61	479,18	-1,43	480,86	479,06	-1,80	498,27	452,89	-45,38
I12	479,67	477,18	-2,49	480,86	479,67	-1,18	498,27	454,66	-43,61
I13	623,15	623,15	0,00	622,92	611,70	-11,22	614,52	611,40	-3,12
I14	611,70	611,70	0,00	612,70	612,70	0,00	612,80	611,40	-1,40
I15	401,03	406,80	5,77	393,61	389,68	-3,93	394,03	385,02	-9,01
I16	363,24	363,24	0,00	363,24	353,84	-9,40	362,40	340,23	-22,17
I17	611,70	612,70	1,00	611,70	611,70	0,00	611,40	611,40	0,00
I18	611,70	611,70	0,00	611,70	611,70	0,00	611,40	611,40	0,00
I19	611,70	611,70	0,00	611,70	611,70	0,00	611,40	611,40	0,00
I20	611,70	611,70	0,00	611,70	611,70	0,00	611,40	611,40	0,00
		Dif. Total	4,11		Dif. Total	-70,72		Dif. Total	-325,04

En este caso, como podemos apreciar en la tabla 12, al no considerar la técnica 2D Bin Packing, el valor del makespan disminuye considerando 2 y 3 orientaciones en un total de **70,72** y **325,04** unidades de tiempo respectivamente, pero aumenta considerando una única orientación en un total de **4,11** unidades de tiempo. De nuevo nos encontramos en algunos experimentos que el relajar el uso del 2D Bin Packing se empeora respecto del mismo problema cuando se usa 2D Bin Packing. Esta anomalía se debe al estar usando una heurística.

- Minimizar Total Costs

Por último, se compara el uso del 2D Bin Packing, minimizando el *Total Costs*. Para ello, comparamos el valor

de la función objetivo de cada instancia a través de la columna “Diferencia”, donde se refleja la diferencia entre el uso de dicha técnica.

Tabla 13. Comparación uso 2D Bin Packing Min Total Costs

Test Instance	Semi-parallel Heuristic 10			Semi-parallel Heuristic 20			Semi-parallel Heuristic 30		
	2D Nesting	SIN 2D Nesting	Diferencia	2D Nesting	SIN 2D Nesting	Diferencia	2D Nesting	SIN 2D Nesting	Diferencia
I1	45157,63	44315,63	-842,00	45121,63	44027,63	-1094,00	44765,63	44121,63	-644,00
I2	104363,52	103697,50	-666,02	104115,51	103143,50	-972,01	104115,51	103107,50	-1008,01
I3	76054,48	75200,47	-854,01	75728,48	74712,47	-1016,01	75440,47	74502,47	-938,00
I4	97307,84	95853,83	-1454,01	96615,83	95359,84	-1255,99	96603,83	95809,83	-794,00
I5	76054,48	75200,47	-854,01	75728,48	74712,47	-1016,01	75440,47	74502,47	-938,00
I6	97307,84	95853,83	-1454,01	96615,83	95359,84	-1255,99	96603,83	95809,83	-794,00
I7	94730,84	93848,84	-882,00	94764,84	93224,84	-1539,99	94238,83	93114,84	-1123,99
I8	132084,47	130828,45	-1256,02	131476,47	130508,45	-968,02	131374,45	130412,46	-961,99
I9	172035,55	170731,55	-1304,00	171859,53	170373,53	-1486,00	171457,53	170225,53	-1232,00
I10	168659,31	167475,30	-1184,02	167773,31	166875,30	-898,02	167767,31	166873,28	-894,03
I11	148771,11	147569,11	-1202,00	148583,14	147103,13	-1480,02	147905,14	146929,14	-976,00
I12	148771,11	147569,11	-1202,00	148583,14	147103,13	-1480,02	147905,14	146929,14	-976,00
I13	191204,92	189462,89	-1742,03	190110,91	188840,91	-1270,00	190072,92	188922,89	-1150,03
I14	191204,92	189462,89	-1742,03	190110,91	188840,91	-1270,00	190072,92	188922,89	-1150,03
I15	181533,23	179881,28	-1651,95	181065,27	179619,27	-1446,00	180889,27	179607,27	-1282,00
I16	181533,23	179881,28	-1651,95	181065,27	179619,27	-1446,00	180889,27	179607,27	-1282,00
I17	238256,81	236332,77	-1924,05	237660,80	236112,80	-1548,00	237332,83	235764,80	-1568,03
I18	238256,81	236332,77	-1924,05	237660,80	236112,80	-1548,00	237332,83	235764,80	-1568,03
I19	278470,69	275736,63	-2734,06	277830,66	275512,59	-2318,06	277118,63	275372,63	-1746,00
I20	278470,69	275736,63	-2734,06	277830,66	275512,59	-2318,06	277118,63	275372,63	-1746,00
		<b>Dif. Total</b>	<b>-29258,27</b>		<b>Dif. Total</b>	<b>-27626,19</b>		<b>Dif. Total</b>	<b>-22772,15</b>

Como se puede apreciar en la tabla 13, al no considerar la técnica 2D Bin Packing, el cote total disminuye en todas las instancias del estudio.

Considerando solo una orientación, el valor de la función objetivo disminuye un total de **29.258,27** unidades monetarias, considerando 20 se reduce un total de **27.626,19** unidades monetarias y considerando 30 un total de **22.772,15**.

# 6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

---

## 6.1 Conclusiones del estudio

En este trabajo final de grado se ha abordado el problema de la planificación de la producción en fabricación aditiva mediante la implementación de técnicas avanzadas como el 2D Nesting y la consideración de múltiples orientaciones para las piezas. La investigación se ha centrado en cómo la adición de diversas orientaciones a las piezas puede mejorar la eficiencia y optimización del proceso de producción. Para ello, hemos desarrollado una heurística de construcción semiparalela muy eficiente, que es una adaptación de la heurística de Paraskevopoulos et al. (2008) para problemas de rutas de vehículos (VRP).

La heurística desarrollada se ha adaptado al problema en estudio para tres posibles funciones objetivos: minimizar el tiempo de finalización de los trabajos (*makespan*), minimizar los costes totales de producción (*total costs*) y minimizar los tiempos de retrasos en las entregas (*total tardiness*).

A lo largo del estudio, se ha demostrado que la consideración de múltiples orientaciones permite una mejor utilización del espacio disponible, lo que se traduce en una reducción significativa de material desperdiciado y un aumento de la capacidad de producción. Este enfoque no solo optimiza el uso del material, sino que también reduce los tiempos de producción y los costos asociados.

Comparando los resultados obtenidos con y sin la aplicación de la técnica 2D Bin Packing, se ha evidenciado que la integración de esta técnica junto con la consideración de múltiples orientaciones proporciona soluciones más realistas, pero inferiores que sin considerarla en la mayoría de los casos. La técnica 2D Bin Packing, por sí sola, ofrece mejoras en la disposición de las piezas; sin embargo, al complementarla con la capacidad de orientar las piezas de diversas maneras, se alcanzan niveles óptimos de eficiencia que no se podrían lograr de otra forma.

En resumen, la combinación de técnicas de 2D Nesting y la consideración de múltiples orientaciones de las piezas en fabricación aditiva se presenta como una estrategia altamente efectiva para la planificación de la producción. Esta combinación no solo mejora la utilización del espacio y los recursos, sino que también ofrece un enfoque más flexible y adaptable a diferentes tipos de producción. Por tanto, la implementación de estas técnicas puede considerarse un avance significativo en el campo de la fabricación aditiva, aportando beneficios tangibles tanto en términos de eficiencia como de sostenibilidad.

## 6.2 Líneas futuras de investigación

Como se ha demostrado minimizando el valor de la función objetivo para el *makespan* considerando 2 y 3 orientaciones para cada pieza, la heurística desarrollada no tiene la capacidad de llegar a la solución óptima debido al gran tamaño del problema, por lo que una futura mejora a este trabajo sería emplear un algoritmo de resolución más complejo como puede ser la implementación de una metaheurística.

# REFERENCIAS

- Alicastro, M., Ferone, D., Festa, P., Fugaro, S., & Pastore, T. (2021). A reinforcement learning iterated local search for makespan minimization in additive manufacturing machine scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 131, 105272.
- Aloui, A., & Hadj-Hamou, K. (2021). A heuristic approach for a scheduling problem in additive manufacturing under technological constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107115.
- Araújo, L. J. P., Panesar, A., Özcan, E., Atkin, J., Baumers, M., & Ashcroft, I. (2020). An experimental analysis of deepest bottom-left-fill packing methods for additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(22), 6917–6933.
- Canellidis, V., Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2016). Evolutionary computing and genetic algorithms: Paradigm applications in 3D printing process optimization. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 627, pp. 271–298). Springer Verlag.
- Che, Y., Hu, K., Zhang, Z., & Lim, A. (2021). Machine scheduling with orientation selection and two-dimensional packing for additive manufacturing. *Computers & Operations Research*, 130, 105245.
- Chergui, A., Hadj-Hamou, K., & Vignat, F. (2018). Production scheduling and nesting in additive manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 292-301.
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., Dolatnezhadsomarini, A., Guardiani, E., & Khorram, E. (2020a). A reliable build orientation optimization method in additive manufacturing: The application to FDM technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(1–2), 263–276.
- Dickinson, J. K., & Knopf, G. K. (1998). Serial packing of arbitrary 3D objects for optimizing layered manufacturing. In Casasent, D. P. (Ed.), *Intelligent robots and computer vision XVII: Algorithms, techniques, and active vision, society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE) conference series* (Vol. 3522, pp. 130–138).
- Dickinson, J. K., & Knopf, G. K. (2002). Packing subsets of 3D parts for layered manufacturing. *International Journal of Smart Engineering System Design*, 4(3), 147–161.
- Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F., & Lambiase, A. (2018). A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 673-685.
- Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F., & Lambiase, A. (2020). A modified tabu search algorithm for the single-machine scheduling problem using additive manufacturing technology. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(3), 401-4.
- Framinan, J. M., Perez-Gonzalez, P., & Fernandez-Viagas, V. (2023). An overview on the use of operations research in additive manufacturing. *Annals of Operations Research*, 322(1), 5-40.
- Frank, D., & Fadel, G. (1995). Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 6(5), 339–345.
- Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- Gogate, A. S., & Pande, S. S. (2008). Intelligent layout planning for rapid prototyping. *International Journal of Production Research*, 46(20), 5607–5631.
- Griffiths, V., Scanlan, J. P., Eres, M. H., Martinez-Sykora, A., & Chinchapatnam, P. (2019). Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM). *European Journal of Operational*

*Research*, 273(1), 334–352.

- Hernández-Castellano, P. M., Martínez-Rivero, M., , Gutiérrez-Barcenilla, A., Suárez-García, L., & Marrero-Alemán, M. (2019). *Fabricación Aditiva: material didáctico interactivo*. (No. COMPON-2019-CINAIC-0057).
- Hur, S.-M., Choi, K.-H., Lee, S.-H., & Chang, P.-K. (2001). Determination of fabricating orientation and packing in SLS process. *Journal of Materials Processing Technology*, 112(2–3), 236–243.
- Ikonen, I., Biles, W., Kumar, A., Ragade, R. K., & Wissel, J. C. (1997). A genetic algorithm for packing threedimensional non-convex objects having cavities and holes. *Proceedings of 7th International Conference on Genetic Algorithms* (pp. 591–598).
- Joshi, S. C., & Sheikh, A. A. (2015). 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and physical prototyping*, 10(4), 175–185.
- Khodaygan, S., & Golmohammadi, A. H. (2018). Multi-criteria optimization of the part build orientation (PBO) through a combined meta-modeling/NSGAI/TOPSIS method for additive manufacturing processes. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 12, 1071–1085.
- Kucukkoc, I. (2019). MILP models to minimise makespan in additive manufacturing machine scheduling. *Computers and Operations Research*, 105.
- Kucukkoc, I., Li, Z., & Tang, Q. (2021). 2D Nesting and Scheduling in Metal Additive Manufacturing In *Optimization and Data Science: Trends and Applications: 5th AIRO Young Workshop and AIRO PhD School 2021 Joint Event* (pp. 169–180). Springer International Publishing.
- Lan, P.-T., Chou, S.-Y., Chent, L.-L., & Gemmill, D. (1997). Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus. *Computer-Aided Design*, 29, 62.
- Li, Q., Kucukkoc, I., & Zhang, D. Z. (2017). Production planning in additive manufacturing and 3D printing. *Computers & Operations Research*, 83, 157–172.
- Lodi, A., Martello, S., & Vigo, D. (1999). Heuristic and metaheuristic approaches for a class of two-dimensional bin packing problems, *INFORMS J. Comput.* 11 345–357.
- Lodi, A., Martello, S., & Vigo, D. (2002). Recent advances on two-dimensional bin packing problems. *Discrete Applied Mathematics*, 123(1-3), 379–396.
- Martello, S., & Vigo, D. (1998). Exact solution of the two-dimensional finite bin packing problem, *Manage. Sci.* 44 388–399.
- Muguruza, A. (2019). *Contribución a las tecnologías de fabricación aditiva para la obtención de piezas multimaterial, combinando la impresión 3D por máscara con la impresión funcional mediante sistemas InkJet*. Tesis Doctoral. UPC.
- Oh, Y., Witherell, P., Lu, Y., & Sprock, T. (2020). Nesting and scheduling problems for additive manufacturing: A taxonomy and review. *Additive Manufacturing*, 36, 101492.
- Oh, Y., Zhou, C., & Behdad, S. (2020b). The impact of build orientation policies on the completion time in wodimensional irregular packing for additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(21), 6601–6615.
- Paraskevopoulos, D. C., Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., Ioannou, G., & Prastacos, G. P. (2008). A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *Journal of Heuristics*, 14(5), 425–455.
- Qin, Y., Qi, Q., Scott, P. J., & Jiang, X. (2019). Determination of optimal build orientation for additive manufacturing using Muirhead mean and prioritised average operators. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(8), 3015–3034.
- Ransikarbum, K., Ha, S., Ma, J., & Kim, N. (2017). Multi-objective optimization analysis for part-to-Printer assignment in a network of 3D fused deposition modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 35–46.
- Ransikarbum, K., Pitakaso, R., Kim, N., & Ma, J. (2021). Multicriteria decision analysis framework for part

- orientation analysis in additive manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(4), 1141–1157.
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., & ... & Martina, F. (2016). *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. CIRP annals, 65(2), 737-760.
- Thrimurthulu, K., Pandey, P. M., & Reddy, N. V. (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 585–594.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37.
- Wodziak, J. R., Fadel, G. M., & Kirschman, C. (1994). A genetic algorithm for optimizing multiple part placement to reduce build time. In *Proceedings of the 5th international conference on rapid prototyping*.
- Xu, F., Wong, Y. S., Loh, H. T., Fuh, J. Y. H., & The, T. M. (1997). Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 3, 76–88.
- Zhang, Y., Gupta, R. K., & Bernard, A. (2016). Two-dimensional placement optimization for multi-parts production in additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 38, 102-117.
- Zhang, Y., Bernard, A., Harik, R., & Karunakaran, K. P. (2017). Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(6), 1393–1407.
- Zhang, J., Yao, X., & Li, Y. (2020). Improved evolutionary algorithm for parallel batch processing machine scheduling in additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2263-2282.
- Zhang, X., & Liou, F. (2021). Introduction to additive manufacturing. In *Additive manufacturing (pp. 1-31)*. Elsevier.



# ANEXOS

## Anexo 1. Ficheros AMO de las 20 instancias con 1 orientación

El formato de los ficheros de datos “AMO” han sido detallado en el apartado 5.1 “Generación de instancias”.

Tal como se explica en dicho apartado 5.1, los ficheros de 2 y 3 orientaciones se generan a partir de estos ficheros de 1 orientación, rotando los valores de la “Altura” el “Ancho” y el “Largo” de cada pieza. Por ello, solo se anexan los 20 ficheros de 1 orientación.

### INSTANCIA II\_10

Número parts:

12

Número jobs máximo:

5

Número máquinas:

2

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00



12      1 12.80      123.90 5.90      21.00

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I2\_10**

Número parts:

12

Número jobs máximo:

6

Número máquinas:

2

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	7347.60	97.15	634.57	P13
2	1	333.60	97.25	177.55	P14
3	1	2956.00	101.75	355.30	P15
4	1	32.50	106.95	258.75	P16
5	1	265.60	107.58	295.55	P17
6	1	1387.40	115.55	509.62	P18
7	1	1086.00	128.37	294.25	P19
8	1	3559.20	132.32	575.72	P20
9	1	2902.90	134.15	569.97	P21
10	1	854.60	136.65	353.23	P22
11	1	1986.00	138.30	326.28	P23
12	1	2974.30	149.48	515.72	P24

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	28.40	333.50	21.80	15.30
2	1	10.90	74.20	23.20	3.20
3	1	14.10	268.50	19.60	13.70
4	1	3.90	11.20	3.60	3.10
5	1	3.20	138.90	10.60	13.10
6	1	24.60	92.00	7.30	12.60
7	1	7.10	424.00	21.20	20.00
8	1	25.20	181.40	8.40	21.60
9	1	29.60	173.80	16.40	10.60
10	1	21.10	86.40	10.80	8.00
11	1	25.20	107.80	22.00	4.90
12	1	28.20	141.60	9.50	14.90

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I3\_10**

Número parts:

14

Número jobs máximo:

6

Número máquinas:

2

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30
14	1	10.90	74.20	23.20	3.20

\*\*\*\*\*

mach.	TC (1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I4\_10**

Número parts:

14

Número jobs máximo:

6

Número máquinas:

2

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	2956.00	101.75	355.30	P15
2	1	32.50	106.95	258.75	P16
3	1	265.60	107.58	295.55	P17
4	1	1387.40	115.55	509.62	P18
5	1	1086.00	128.37	294.25	P19
6	1	3559.20	132.32	575.72	P20
7	1	2902.90	134.15	569.97	P21
8	1	854.60	136.65	353.23	P22
9	1	1986.00	138.30	326.28	P23
10	1	2974.30	149.48	515.72	P24
11	1	408.20	164.08	525.87	P25
12	1	1271.40	167.45	362.63	P26
13	1	252.40	177.23	358.03	P27
14	1	3740.90	206.40	589.43	P28

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	14.10	268.50	19.60	13.70
2	1	3.90	11.20	3.60	3.10
3	1	3.20	138.90	10.60	13.10
4	1	24.60	92.00	7.30	12.60
5	1	7.10	424.00	21.20	20.00
6	1	25.20	181.40	8.40	21.60
7	1	29.60	173.80	16.40	10.60
8	1	21.10	86.40	10.80	8.00
9	1	25.20	107.80	22.00	4.90
10	1	28.20	141.60	9.50	14.90
11	1	22.90	29.00	6.30	4.60
12	1	24.20	166.40	17.70	9.40
13	1	19.00	20.90	1.00	20.90
14	1	26.60	220.60	11.20	19.70

\*\*\*\*\*

mach.	TC (1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo
1	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00 M1
2	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00 M2

**INSTANCIA I5\_10**

Número parts:

14

Número jobs máximo:

5

Número máquinas:

3

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30
14	1	10.90	74.20	23.20	3.20

\*\*\*\*\*

mach.	TC (1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
3	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I6\_10**

Número parts:

14

Número jobs máximo:

6

Número máquinas:

3

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	2956.00	101.75	355.30	P15
2	1	32.50	106.95	258.75	P16
3	1	265.60	107.58	295.55	P17
4	1	1387.40	115.55	509.62	P18
5	1	1086.00	128.37	294.25	P19
6	1	3559.20	132.32	575.72	P20
7	1	2902.90	134.15	569.97	P21
8	1	854.60	136.65	353.23	P22
9	1	1986.00	138.30	326.28	P23
10	1	2974.30	149.48	515.72	P24
11	1	408.20	164.08	525.87	P25
12	1	1271.40	167.45	362.63	P26
13	1	252.40	177.23	358.03	P27
14	1	3740.90	206.40	589.43	P28

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	14.10	268.50	19.60	13.70
2	1	3.90	11.20	3.60	3.10
3	1	3.20	138.90	10.60	13.10
4	1	24.60	92.00	7.30	12.60
5	1	7.10	424.00	21.20	20.00
6	1	25.20	181.40	8.40	21.60
7	1	29.60	173.80	16.40	10.60
8	1	21.10	86.40	10.80	8.00
9	1	25.20	107.80	22.00	4.90
10	1	28.20	141.60	9.50	14.90
11	1	22.90	29.00	6.30	4.60
12	1	24.20	166.40	17.70	9.40
13	1	19.00	20.90	1.00	20.90
14	1	26.60	220.60	11.20	19.70

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I7\_10**

Número parts:

18

Número jobs máximo:

8

Número máquinas:

2

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14
15	1	2956.00	101.75	355.30	P15
16	1	32.50	106.95	258.75	P16
17	1	265.60	107.58	295.55	P17
18	1	1387.40	115.55	509.62	P18

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30
14	1	10.90	74.20	23.20	3.20
15	1	14.10	268.50	19.60	13.70
16	1	3.90	11.20	3.60	3.10
17	1	3.20	138.90	10.60	13.10
18	1	24.60	92.00	7.30	12.60

\*\*\*\*\*

---

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2



**INSTANCIA I8\_10**

Número parts:

18

Número jobs máximo:

7

Número máquinas:

2

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	201.90	93.03	447.13	P11
2	1	866.10	93.10	445.10	P12
3	1	7347.60	97.15	634.57	P13
4	1	333.60	97.25	177.55	P14
5	1	2956.00	101.75	355.30	P15
6	1	32.50	106.95	258.75	P16
7	1	265.60	107.58	295.55	P17
8	1	1387.40	115.55	509.62	P18
9	1	1086.00	128.37	294.25	P19
10	1	3559.20	132.32	575.72	P20
11	1	2902.90	134.15	569.97	P21
12	1	854.60	136.65	353.23	P22
13	1	1986.00	138.30	326.28	P23
14	1	2974.30	149.48	515.72	P24
15	1	408.20	164.08	525.87	P25
16	1	1271.40	167.45	362.63	P26
17	1	252.40	177.23	358.03	P27
18	1	3740.90	206.40	589.43	P28

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	26.30	20.00	4.00	5.00
2	1	12.80	123.90	5.90	21.00
3	1	28.40	333.50	21.80	15.30
4	1	10.90	74.20	23.20	3.20
5	1	14.10	268.50	19.60	13.70
6	1	3.90	11.20	3.60	3.10
7	1	3.20	138.90	10.60	13.10
8	1	24.60	92.00	7.30	12.60
9	1	7.10	424.00	21.20	20.00
10	1	25.20	181.40	8.40	21.60
11	1	29.60	173.80	16.40	10.60
12	1	21.10	86.40	10.80	8.00
13	1	25.20	107.80	22.00	4.90
14	1	28.20	141.60	9.50	14.90
15	1	22.90	29.00	6.30	4.60
16	1	24.20	166.40	17.70	9.40
17	1	19.00	20.90	1.00	20.90
18	1	26.60	220.60	11.20	19.70

\*\*\*\*\*

---

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I9\_10**

Número parts:

18

Número jobs máximo:

8

Número máquinas:

2

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	2956.00	101.75	355.30	P15
2	1	32.50	106.95	258.75	P16
3	1	265.60	107.58	295.55	P17
4	1	1387.40	115.55	509.62	P18
5	1	1086.00	128.37	294.25	P19
6	1	3559.20	132.32	575.72	P20
7	1	2902.90	134.15	569.97	P21
8	1	854.60	136.65	353.23	P22
9	1	1986.00	138.30	326.28	P23
10	1	2974.30	149.48	515.72	P24
11	1	408.20	164.08	525.87	P25
12	1	1271.40	167.45	362.63	P26
13	1	252.40	177.23	358.03	P27
14	1	3740.90	206.40	589.43	P28
15	1	991.90	219.62	560.93	P29
16	1	1377.60	228.55	653.97	P30
17	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
18	1	5234.10	244.87	739.32	P32

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	14.10	268.50	19.60	13.70
2	1	3.90	11.20	3.60	3.10
3	1	3.20	138.90	10.60	13.10
4	1	24.60	92.00	7.30	12.60
5	1	7.10	424.00	21.20	20.00
6	1	25.20	181.40	8.40	21.60
7	1	29.60	173.80	16.40	10.60
8	1	21.10	86.40	10.80	8.00
9	1	25.20	107.80	22.00	4.90
10	1	28.20	141.60	9.50	14.90
11	1	22.90	29.00	6.30	4.60
12	1	24.20	166.40	17.70	9.40
13	1	19.00	20.90	1.00	20.90
14	1	26.60	220.60	11.20	19.70
15	1	18.50	102.50	12.50	8.20
16	1	10.10	183.30	15.40	11.90
17	1	24.50	592.90	24.50	24.20
18	1	30.60	273.70	23.00	11.90

\*\*\*\*\*

---

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I10\_10**

Número parts:

18

Número jobs máximo:

9

Número máquinas:

3

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1086.00	128.37	294.25	P19
2	1	3559.20	132.32	575.72	P20
3	1	2902.90	134.15	569.97	P21
4	1	854.60	136.65	353.23	P22
5	1	1986.00	138.30	326.28	P23
6	1	2974.30	149.48	515.72	P24
7	1	408.20	164.08	525.87	P25
8	1	1271.40	167.45	362.63	P26
9	1	252.40	177.23	358.03	P27
10	1	3740.90	206.40	589.43	P28
11	1	991.90	219.62	560.93	P29
12	1	1377.60	228.55	653.97	P30
13	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
14	1	5234.10	244.87	739.32	P32
15	1	274.60	245.08	553.43	P33
16	1	2628.40	248.18	536.87	P34
17	1	206.90	258.98	524.58	P35
18	1	639.50	268.42	646.72	P36

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	7.10	424.00	21.20	20.00
2	1	25.20	181.40	8.40	21.60
3	1	29.60	173.80	16.40	10.60
4	1	21.10	86.40	10.80	8.00
5	1	25.20	107.80	22.00	4.90
6	1	28.20	141.60	9.50	14.90
7	1	22.90	29.00	6.30	4.60
8	1	24.20	166.40	17.70	9.40
9	1	19.00	20.90	1.00	20.90
10	1	26.60	220.60	11.20	19.70
11	1	18.50	102.50	12.50	8.20
12	1	10.10	183.30	15.40	11.90
13	1	24.50	592.90	24.50	24.20
14	1	30.60	273.70	23.00	11.90
15	1	3.10	145.50	14.70	9.90
16	1	18.90	257.50	17.40	14.80
17	1	11.20	40.60	1.70	23.90
18	1	4.60	202.80	19.50	10.40

\*\*\*\*\*

---

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I11\_10**

Número parts:

24

Número jobs máximo:

9

Número máquinas:

3

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14
15	1	2956.00	101.75	355.30	P15
16	1	32.50	106.95	258.75	P16
17	1	265.60	107.58	295.55	P17
18	1	1387.40	115.55	509.62	P18
19	1	1086.00	128.37	294.25	P19
20	1	3559.20	132.32	575.72	P20
21	1	2902.90	134.15	569.97	P21
22	1	854.60	136.65	353.23	P22
23	1	1986.00	138.30	326.28	P23
24	1	2974.30	149.48	515.72	P24

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30

14	1	10.90	74.20	23.20	3.20
15	1	14.10	268.50	19.60	13.70
16	1	3.90	11.20	3.60	3.10
17	1	3.20	138.90	10.60	13.10
18	1	24.60	92.00	7.30	12.60
19	1	7.10	424.00	21.20	20.00
20	1	25.20	181.40	8.40	21.60
21	1	29.60	173.80	16.40	10.60
22	1	21.10	86.40	10.80	8.00
23	1	25.20	107.80	22.00	4.90
24	1	28.20	141.60	9.50	14.90

\*\*\*\*\*

mach.	TC (1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2



**INSTANCIA I12\_10**

Número parts:

24

Número jobs máximo:

9

Número máquinas:

3

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14
15	1	2956.00	101.75	355.30	P15
16	1	32.50	106.95	258.75	P16
17	1	265.60	107.58	295.55	P17
18	1	1387.40	115.55	509.62	P18
19	1	1086.00	128.37	294.25	P19
20	1	3559.20	132.32	575.72	P20
21	1	2902.90	134.15	569.97	P21
22	1	854.60	136.65	353.23	P22
23	1	1986.00	138.30	326.28	P23
24	1	2974.30	149.48	515.72	P24

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30

14	1	10.90	74.20	23.20	3.20
15	1	14.10	268.50	19.60	13.70
16	1	3.90	11.20	3.60	3.10
17	1	3.20	138.90	10.60	13.10
18	1	24.60	92.00	7.30	12.60
19	1	7.10	424.00	21.20	20.00
20	1	25.20	181.40	8.40	21.60
21	1	29.60	173.80	16.40	10.60
22	1	21.10	86.40	10.80	8.00
23	1	25.20	107.80	22.00	4.90
24	1	28.20	141.60	9.50	14.90

\*\*\*\*\*

mach.	TC (1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
3	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I13\_10**

Número parts:

24

Número jobs máximo:

9

Número máquinas:

4

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	265.60	107.58	295.55	P17
2	1	1387.40	115.55	509.62	P18
3	1	1086.00	128.37	294.25	P19
4	1	3559.20	132.32	575.72	P20
5	1	2902.90	134.15	569.97	P21
6	1	854.60	136.65	353.23	P22
7	1	1986.00	138.30	326.28	P23
8	1	2974.30	149.48	515.72	P24
9	1	408.20	164.08	525.87	P25
10	1	1271.40	167.45	362.63	P26
11	1	252.40	177.23	358.03	P27
12	1	3740.90	206.40	589.43	P28
13	1	991.90	219.62	560.93	P29
14	1	1377.60	228.55	653.97	P30
15	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
16	1	5234.10	244.87	739.32	P32
17	1	274.60	245.08	553.43	P33
18	1	2628.40	248.18	536.87	P34
19	1	206.90	258.98	524.58	P35
20	1	639.50	268.42	646.72	P36
21	1	431.50	279.77	691.40	P37
22	1	968.20	286.25	566.03	P38
23	1	95.00	290.73	335.78	P39
24	1	2306.20	294.53	473.53	P40

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	3.20	138.90	10.60	13.10
2	1	24.60	92.00	7.30	12.60
3	1	7.10	424.00	21.20	20.00
4	1	25.20	181.40	8.40	21.60
5	1	29.60	173.80	16.40	10.60
6	1	21.10	86.40	10.80	8.00
7	1	25.20	107.80	22.00	4.90
8	1	28.20	141.60	9.50	14.90
9	1	22.90	29.00	6.30	4.60
10	1	24.20	166.40	17.70	9.40
11	1	19.00	20.90	1.00	20.90
12	1	26.60	220.60	11.20	19.70
13	1	18.50	102.50	12.50	8.20

14	1	10.10	183.30	15.40	11.90
15	1	24.50	592.90	24.50	24.20
16	1	30.60	273.70	23.00	11.90
17	1	3.10	145.50	14.70	9.90
18	1	18.90	257.50	17.40	14.80
19	1	11.20	40.60	1.70	23.90
20	1	4.60	202.80	19.50	10.40
21	1	23.40	41.30	2.60	15.90
22	1	7.50	253.50	13.70	18.50
23	1	12.70	11.50	8.20	1.40
24	1	22.70	178.80	14.30	12.50

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
4	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

## INSTANCIA I14\_10

Número parts:

24

Número jobs máximo:

10

Número máquinas:

5

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	265.60	107.58	295.55	P17
2	1	1387.40	115.55	509.62	P18
3	1	1086.00	128.37	294.25	P19
4	1	3559.20	132.32	575.72	P20
5	1	2902.90	134.15	569.97	P21
6	1	854.60	136.65	353.23	P22
7	1	1986.00	138.30	326.28	P23
8	1	2974.30	149.48	515.72	P24
9	1	408.20	164.08	525.87	P25
10	1	1271.40	167.45	362.63	P26
11	1	252.40	177.23	358.03	P27
12	1	3740.90	206.40	589.43	P28
13	1	991.90	219.62	560.93	P29
14	1	1377.60	228.55	653.97	P30
15	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
16	1	5234.10	244.87	739.32	P32
17	1	274.60	245.08	553.43	P33
18	1	2628.40	248.18	536.87	P34
19	1	206.90	258.98	524.58	P35
20	1	639.50	268.42	646.72	P36
21	1	431.50	279.77	691.40	P37
22	1	968.20	286.25	566.03	P38
23	1	95.00	290.73	335.78	P39
24	1	2306.20	294.53	473.53	P40

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	3.20	138.90	10.60	13.10
2	1	24.60	92.00	7.30	12.60
3	1	7.10	424.00	21.20	20.00
4	1	25.20	181.40	8.40	21.60
5	1	29.60	173.80	16.40	10.60
6	1	21.10	86.40	10.80	8.00
7	1	25.20	107.80	22.00	4.90
8	1	28.20	141.60	9.50	14.90
9	1	22.90	29.00	6.30	4.60
10	1	24.20	166.40	17.70	9.40
11	1	19.00	20.90	1.00	20.90
12	1	26.60	220.60	11.20	19.70
13	1	18.50	102.50	12.50	8.20

14	1	10.10	183.30	15.40	11.90
15	1	24.50	592.90	24.50	24.20
16	1	30.60	273.70	23.00	11.90
17	1	3.10	145.50	14.70	9.90
18	1	18.90	257.50	17.40	14.80
19	1	11.20	40.60	1.70	23.90
20	1	4.60	202.80	19.50	10.40
21	1	23.40	41.30	2.60	15.90
22	1	7.50	253.50	13.70	18.50
23	1	12.70	11.50	8.20	1.40
24	1	22.70	178.80	14.30	12.50

\*\*\*\*\*

mach.	TC (1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60 32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
4	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
5	60 32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I15\_10**

Número parts:

30

Número jobs máximo:

12

Número máquinas:

5

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14
15	1	2956.00	101.75	355.30	P15
16	1	32.50	106.95	258.75	P16
17	1	265.60	107.58	295.55	P17
18	1	1387.40	115.55	509.62	P18
19	1	1086.00	128.37	294.25	P19
20	1	3559.20	132.32	575.72	P20
21	1	2902.90	134.15	569.97	P21
22	1	854.60	136.65	353.23	P22
23	1	1986.00	138.30	326.28	P23
24	1	2974.30	149.48	515.72	P24
25	1	408.20	164.08	525.87	P25
26	1	1271.40	167.45	362.63	P26
27	1	252.40	177.23	358.03	P27
28	1	3740.90	206.40	589.43	P28
29	1	991.90	219.62	560.93	P29
30	1	1377.60	228.55	653.97	P30

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70

8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30
14	1	10.90	74.20	23.20	3.20
15	1	14.10	268.50	19.60	13.70
16	1	3.90	11.20	3.60	3.10
17	1	3.20	138.90	10.60	13.10
18	1	24.60	92.00	7.30	12.60
19	1	7.10	424.00	21.20	20.00
20	1	25.20	181.40	8.40	21.60
21	1	29.60	173.80	16.40	10.60
22	1	21.10	86.40	10.80	8.00
23	1	25.20	107.80	22.00	4.90
24	1	28.20	141.60	9.50	14.90
25	1	22.90	29.00	6.30	4.60
26	1	24.20	166.40	17.70	9.40
27	1	19.00	20.90	1.00	20.90
28	1	26.60	220.60	11.20	19.70
29	1	18.50	102.50	12.50	8.20
30	1	10.10	183.30	15.40	11.90

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
4	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
5	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2



## INSTANCIA I16\_10

Número parts:

30

Número jobs máximo:

11

Número máquinas:

6

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14
15	1	2956.00	101.75	355.30	P15
16	1	32.50	106.95	258.75	P16
17	1	265.60	107.58	295.55	P17
18	1	1387.40	115.55	509.62	P18
19	1	1086.00	128.37	294.25	P19
20	1	3559.20	132.32	575.72	P20
21	1	2902.90	134.15	569.97	P21
22	1	854.60	136.65	353.23	P22
23	1	1986.00	138.30	326.28	P23
24	1	2974.30	149.48	515.72	P24
25	1	408.20	164.08	525.87	P25
26	1	1271.40	167.45	362.63	P26
27	1	252.40	177.23	358.03	P27
28	1	3740.90	206.40	589.43	P28
29	1	991.90	219.62	560.93	P29
30	1	1377.60	228.55	653.97	P30

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70

8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30
14	1	10.90	74.20	23.20	3.20
15	1	14.10	268.50	19.60	13.70
16	1	3.90	11.20	3.60	3.10
17	1	3.20	138.90	10.60	13.10
18	1	24.60	92.00	7.30	12.60
19	1	7.10	424.00	21.20	20.00
20	1	25.20	181.40	8.40	21.60
21	1	29.60	173.80	16.40	10.60
22	1	21.10	86.40	10.80	8.00
23	1	25.20	107.80	22.00	4.90
24	1	28.20	141.60	9.50	14.90
25	1	22.90	29.00	6.30	4.60
26	1	24.20	166.40	17.70	9.40
27	1	19.00	20.90	1.00	20.90
28	1	26.60	220.60	11.20	19.70
29	1	18.50	102.50	12.50	8.20
30	1	10.10	183.30	15.40	11.90

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
4	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
5	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
6	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

# INSTANCIA I17\_10

Número parts:

30

Número jobs máximo:

13

Número máquinas:

7

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	201.90	93.03	447.13	P11
2	1	866.10	93.10	445.10	P12
3	1	7347.60	97.15	634.57	P13
4	1	333.60	97.25	177.55	P14
5	1	2956.00	101.75	355.30	P15
6	1	32.50	106.95	258.75	P16
7	1	265.60	107.58	295.55	P17
8	1	1387.40	115.55	509.62	P18
9	1	1086.00	128.37	294.25	P19
10	1	3559.20	132.32	575.72	P20
11	1	2902.90	134.15	569.97	P21
12	1	854.60	136.65	353.23	P22
13	1	1986.00	138.30	326.28	P23
14	1	2974.30	149.48	515.72	P24
15	1	408.20	164.08	525.87	P25
16	1	1271.40	167.45	362.63	P26
17	1	252.40	177.23	358.03	P27
18	1	3740.90	206.40	589.43	P28
19	1	991.90	219.62	560.93	P29
20	1	1377.60	228.55	653.97	P30
21	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
22	1	5234.10	244.87	739.32	P32
23	1	274.60	245.08	553.43	P33
24	1	2628.40	248.18	536.87	P34
25	1	206.90	258.98	524.58	P35
26	1	639.50	268.42	646.72	P36
27	1	431.50	279.77	691.40	P37
28	1	968.20	286.25	566.03	P38
29	1	95.00	290.73	335.78	P39
30	1	2306.20	294.53	473.53	P40

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	26.30	20.00	4.00	5.00
2	1	12.80	123.90	5.90	21.00
3	1	28.40	333.50	21.80	15.30
4	1	10.90	74.20	23.20	3.20
5	1	14.10	268.50	19.60	13.70
6	1	3.90	11.20	3.60	3.10
7	1	3.20	138.90	10.60	13.10

8	1	24.60	92.00	7.30	12.60
9	1	7.10	424.00	21.20	20.00
10	1	25.20	181.40	8.40	21.60
11	1	29.60	173.80	16.40	10.60
12	1	21.10	86.40	10.80	8.00
13	1	25.20	107.80	22.00	4.90
14	1	28.20	141.60	9.50	14.90
15	1	22.90	29.00	6.30	4.60
16	1	24.20	166.40	17.70	9.40
17	1	19.00	20.90	1.00	20.90
18	1	26.60	220.60	11.20	19.70
19	1	18.50	102.50	12.50	8.20
20	1	10.10	183.30	15.40	11.90
21	1	24.50	592.90	24.50	24.20
22	1	30.60	273.70	23.00	11.90
23	1	3.10	145.50	14.70	9.90
24	1	18.90	257.50	17.40	14.80
25	1	11.20	40.60	1.70	23.90
26	1	4.60	202.80	19.50	10.40
27	1	23.40	41.30	2.60	15.90
28	1	7.50	253.50	13.70	18.50
29	1	12.70	11.50	8.20	1.40
30	1	22.70	178.80	14.30	12.50

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
4	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
5	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
6	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
7	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

## INSTANCIA I18\_10

Número parts:

30

Número jobs máximo:

12

Número máquinas:

8

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	201.90	93.03	447.13	P11
2	1	866.10	93.10	445.10	P12
3	1	7347.60	97.15	634.57	P13
4	1	333.60	97.25	177.55	P14
5	1	2956.00	101.75	355.30	P15
6	1	32.50	106.95	258.75	P16
7	1	265.60	107.58	295.55	P17
8	1	1387.40	115.55	509.62	P18
9	1	1086.00	128.37	294.25	P19
10	1	3559.20	132.32	575.72	P20
11	1	2902.90	134.15	569.97	P21
12	1	854.60	136.65	353.23	P22
13	1	1986.00	138.30	326.28	P23
14	1	2974.30	149.48	515.72	P24
15	1	408.20	164.08	525.87	P25
16	1	1271.40	167.45	362.63	P26
17	1	252.40	177.23	358.03	P27
18	1	3740.90	206.40	589.43	P28
19	1	991.90	219.62	560.93	P29
20	1	1377.60	228.55	653.97	P30
21	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
22	1	5234.10	244.87	739.32	P32
23	1	274.60	245.08	553.43	P33
24	1	2628.40	248.18	536.87	P34
25	1	206.90	258.98	524.58	P35
26	1	639.50	268.42	646.72	P36
27	1	431.50	279.77	691.40	P37
28	1	968.20	286.25	566.03	P38
29	1	95.00	290.73	335.78	P39
30	1	2306.20	294.53	473.53	P40

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	26.30	20.00	4.00	5.00
2	1	12.80	123.90	5.90	21.00
3	1	28.40	333.50	21.80	15.30
4	1	10.90	74.20	23.20	3.20
5	1	14.10	268.50	19.60	13.70
6	1	3.90	11.20	3.60	3.10
7	1	3.20	138.90	10.60	13.10

8	1	24.60	92.00	7.30	12.60
9	1	7.10	424.00	21.20	20.00
10	1	25.20	181.40	8.40	21.60
11	1	29.60	173.80	16.40	10.60
12	1	21.10	86.40	10.80	8.00
13	1	25.20	107.80	22.00	4.90
14	1	28.20	141.60	9.50	14.90
15	1	22.90	29.00	6.30	4.60
16	1	24.20	166.40	17.70	9.40
17	1	19.00	20.90	1.00	20.90
18	1	26.60	220.60	11.20	19.70
19	1	18.50	102.50	12.50	8.20
20	1	10.10	183.30	15.40	11.90
21	1	24.50	592.90	24.50	24.20
22	1	30.60	273.70	23.00	11.90
23	1	3.10	145.50	14.70	9.90
24	1	18.90	257.50	17.40	14.80
25	1	11.20	40.60	1.70	23.90
26	1	4.60	202.80	19.50	10.40
27	1	23.40	41.30	2.60	15.90
28	1	7.50	253.50	13.70	18.50
29	1	12.70	11.50	8.20	1.40
30	1	22.70	178.80	14.30	12.50

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
4	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
5	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
6	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
7	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
8	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

## INSTANCIA I19\_10

Número parts:

40

Número jobs máximo:

15

Número máquinas:

11

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14
15	1	2956.00	101.75	355.30	P15
16	1	32.50	106.95	258.75	P16
17	1	265.60	107.58	295.55	P17
18	1	1387.40	115.55	509.62	P18
19	1	1086.00	128.37	294.25	P19
20	1	3559.20	132.32	575.72	P20
21	1	2902.90	134.15	569.97	P21
22	1	854.60	136.65	353.23	P22
23	1	1986.00	138.30	326.28	P23
24	1	2974.30	149.48	515.72	P24
25	1	408.20	164.08	525.87	P25
26	1	1271.40	167.45	362.63	P26
27	1	252.40	177.23	358.03	P27
28	1	3740.90	206.40	589.43	P28
29	1	991.90	219.62	560.93	P29
30	1	1377.60	228.55	653.97	P30
31	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
32	1	5234.10	244.87	739.32	P32
33	1	274.60	245.08	553.43	P33
34	1	2628.40	248.18	536.87	P34
35	1	206.90	258.98	524.58	P35
36	1	639.50	268.42	646.72	P36
37	1	431.50	279.77	691.40	P37
38	1	968.20	286.25	566.03	P38
39	1	95.00	290.73	335.78	P39

*****											
40	1	2306.20	294.53	473.53	P40						
*****											
part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo						
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00						
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80						
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10						
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90						
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10						
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90						
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70						
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30						
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00						
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40						
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00						
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00						
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30						
14	1	10.90	74.20	23.20	3.20						
15	1	14.10	268.50	19.60	13.70						
16	1	3.90	11.20	3.60	3.10						
17	1	3.20	138.90	10.60	13.10						
18	1	24.60	92.00	7.30	12.60						
19	1	7.10	424.00	21.20	20.00						
20	1	25.20	181.40	8.40	21.60						
21	1	29.60	173.80	16.40	10.60						
22	1	21.10	86.40	10.80	8.00						
23	1	25.20	107.80	22.00	4.90						
24	1	28.20	141.60	9.50	14.90						
25	1	22.90	29.00	6.30	4.60						
26	1	24.20	166.40	17.70	9.40						
27	1	19.00	20.90	1.00	20.90						
28	1	26.60	220.60	11.20	19.70						
29	1	18.50	102.50	12.50	8.20						
30	1	10.10	183.30	15.40	11.90						
31	1	24.50	592.90	24.50	24.20						
32	1	30.60	273.70	23.00	11.90						
33	1	3.10	145.50	14.70	9.90						
34	1	18.90	257.50	17.40	14.80						
35	1	11.20	40.60	1.70	23.90						
36	1	4.60	202.80	19.50	10.40						
37	1	23.40	41.30	2.60	15.90						
38	1	7.50	253.50	13.70	18.50						
39	1	12.70	11.50	8.20	1.40						
40	1	22.70	178.80	14.30	12.50						
*****											
mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1



4	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
5	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
6	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
7	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
8	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
9	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
10	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
11	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2

**INSTANCIA I20\_10**

Número parts:

40

Número jobs máximo:

15

Número máquinas:

12

\*\*\*\*\*

Part #	orient	volumen	FDisp	FEntrega	Nombre
1	1	1573.80	6.25	305.90	P1
2	1	421.30	7.35	282.18	P2
3	1	147.80	9.83	378.25	P3
4	1	285.20	20.95	214.67	P4
5	1	583.30	36.58	148.98	P5
6	1	3282.50	51.50	576.18	P6
7	1	1265.50	56.35	240.42	P7
8	1	723.30	69.90	211.63	P8
9	1	278.50	75.07	330.87	P9
10	1	1051.80	86.00	387.98	P10
11	1	201.90	93.03	447.13	P11
12	1	866.10	93.10	445.10	P12
13	1	7347.60	97.15	634.57	P13
14	1	333.60	97.25	177.55	P14
15	1	2956.00	101.75	355.30	P15
16	1	32.50	106.95	258.75	P16
17	1	265.60	107.58	295.55	P17
18	1	1387.40	115.55	509.62	P18
19	1	1086.00	128.37	294.25	P19
20	1	3559.20	132.32	575.72	P20
21	1	2902.90	134.15	569.97	P21
22	1	854.60	136.65	353.23	P22
23	1	1986.00	138.30	326.28	P23
24	1	2974.30	149.48	515.72	P24
25	1	408.20	164.08	525.87	P25
26	1	1271.40	167.45	362.63	P26
27	1	252.40	177.23	358.03	P27
28	1	3740.90	206.40	589.43	P28
29	1	991.90	219.62	560.93	P29
30	1	1377.60	228.55	653.97	P30
31	1	11122.90	242.90	1177.72	P31
32	1	5234.10	244.87	739.32	P32
33	1	274.60	245.08	553.43	P33
34	1	2628.40	248.18	536.87	P34
35	1	206.90	258.98	524.58	P35
36	1	639.50	268.42	646.72	P36
37	1	431.50	279.77	691.40	P37
38	1	968.20	286.25	566.03	P38
39	1	95.00	290.73	335.78	P39

40 1 2306.20 294.53 473.53 P40

\*\*\*\*\*

part.	orient	Altura	Sup	Ancho	Largo
1	1	16.70	300.80	18.80	16.00
2	1	8.80	152.80	6.70	22.80
3	1	20.30	19.50	9.30	2.10
4	1	7.40	84.20	21.60	3.90
5	1	27.30	61.10	14.90	4.10
6	1	25.80	299.30	23.20	12.90
7	1	14.50	148.70	22.20	6.70
8	1	3.50	376.40	24.60	15.30
9	1	20.40	20.50	20.50	1.00
10	1	23.30	91.10	6.80	13.40
11	1	26.30	20.00	4.00	5.00
12	1	12.80	123.90	5.90	21.00
13	1	28.40	333.50	21.80	15.30
14	1	10.90	74.20	23.20	3.20
15	1	14.10	268.50	19.60	13.70
16	1	3.90	11.20	3.60	3.10
17	1	3.20	138.90	10.60	13.10
18	1	24.60	92.00	7.30	12.60
19	1	7.10	424.00	21.20	20.00
20	1	25.20	181.40	8.40	21.60
21	1	29.60	173.80	16.40	10.60
22	1	21.10	86.40	10.80	8.00
23	1	25.20	107.80	22.00	4.90
24	1	28.20	141.60	9.50	14.90
25	1	22.90	29.00	6.30	4.60
26	1	24.20	166.40	17.70	9.40
27	1	19.00	20.90	1.00	20.90
28	1	26.60	220.60	11.20	19.70
29	1	18.50	102.50	12.50	8.20
30	1	10.10	183.30	15.40	11.90
31	1	24.50	592.90	24.50	24.20
32	1	30.60	273.70	23.00	11.90
33	1	3.10	145.50	14.70	9.90
34	1	18.90	257.50	17.40	14.80
35	1	11.20	40.60	1.70	23.90
36	1	4.60	202.80	19.50	10.40
37	1	23.40	41.30	2.60	15.90
38	1	7.50	253.50	13.70	18.50
39	1	12.70	11.50	8.20	1.40
40	1	22.70	178.80	14.30	12.50

\*\*\*\*\*

mach.	TC	(1/VT)	MC	HT	SET	HC	MA	MH	ancho	largo	
1	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
2	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
3	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
4	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1

---

5	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
6	60	32.40	2	1	2	2	625	32.50	25.00	25.00	M1
7	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
8	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
9	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
10	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
11	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2
12	60	32.40	2	1	1	2	625	32.50	25.00	25.00	M2