

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Organización Industrial

Programación de la producción en una máquina de fabricación aditiva

Autor: Álvaro Morera Mora

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

**Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Organización Industrial

Programación de la producción en una máquina de fabricación aditiva

Autor:
Álvaro Morera Mora

Tutor:
José Manuel Framiñán Torres
Catedrático

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Programación de la producción en una máquina de fabricación aditiva

Autor: Álvaro Morera Mora

Tutor: José Manuel Framiñán Torres

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, 2021

*A mis padres, por guiarme y
ayudarme a conseguir mis metas.*

*A mi hermano, por ser la luz que
ilumina mi vida.*

Resumen

En este proyecto, se analizarán los factores que intervienen en el tiempo total de fabricación en una máquina de fabricación aditiva, con el fin de diseñar varios algoritmos que consigan minimizar este tiempo. Seguidamente, se determinarán las herramientas utilizadas y las hipótesis tomadas. Posteriormente, se compararán los algoritmos, eligiendo el que mejor resultados proporciona. Finalmente, se expondrán las conclusiones a las que se ha llegado y las vías de mejora de la programación de la producción en una máquina de fabricación aditiva de cara al futuro.

Abstract

In the present project, the factors which take part in the total fabrication time in a single machine in additive manufacturing will be analyzed. The main objective is to design several algorithms which achieve the minimum total fabrication time. In addition, the tools used and the hypothesis considered will be established. Afterwards, the algorithms will be compared and the best of them will be chosen. Finally, the conclusions achieved and the possible improves that could be reached in the future of production planning in a single additive manufacturing machine will be exposed.

Índice

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xviii
1 Objeto del Trabajo Fin De Grado	1
1.1 <i>Objeto del trabajo</i>	1
1.2 <i>Motivo de la elección de este problema</i>	1
1.3 <i>Breve descripción de los capítulos del proyecto</i>	2
2 Descripción del problema	5
2.1 <i>Introducción a la fabricación aditiva</i>	5
2.2 <i>Problemas abordados previamente en la literatura</i>	7
2.3 <i>Problema en estudio</i>	8
3 Análisis del problema y algoritmos propuestos	10
3.1 <i>Datos iniciales</i>	10
3.2 <i>Análisis del cálculo del tiempo de fabricación</i>	11
3.3 <i>Algoritmo por Altura</i>	11
3.4 <i>Algoritmo FIFO</i>	14
3.5 <i>Algoritmo First Fit</i>	15
3.6 <i>Algoritmo por Volumen</i>	16
3.7 <i>Algoritmo Ponderado</i>	17
3.8 <i>Algoritmo por Cociente</i>	19
3.9 <i>Algoritmo por Tiempo de Fabricación</i>	22
3.10 <i>Algoritmo por Superficie</i>	23
3.11 <i>Algoritmo de Búsqueda Local</i>	24
4 Experimentación	28
4.1 <i>Hipótesis para la aplicación del algoritmo</i>	28
4.2 <i>Herramientas utilizadas</i>	29
5 Resultados obtenidos	30
5.1 <i>Aspectos clave para la mejora de los resultados</i>	30
5.2 <i>Resultados obtenidos</i>	30
6 Conclusiones	40

6.1	<i>Vías de mejora de cara al futuro</i>	40
Referencias		41
7	Anexo A. Resultados obtenidos	43
7.1	<i>Resultados para el algoritmo FIFO</i>	43
7.2	<i>Resultados para el algoritmo First Fit</i>	44
7.3	<i>Resultados para el algoritmo por volumen</i>	45
7.4	<i>Resultados para el algoritmo ponderado</i>	46
7.5	<i>Resultados para el algoritmo por cociente</i>	47
7.6	<i>Resultados para el algoritmo por tiempo de fabricación</i>	48
7.7	<i>Comparaciones entre algoritmos</i>	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5- 1. Resultados del algoritmo por altura (horas)	32
Tabla 5- 2. Comparación RPD entre algoritmos para CAP: 1600 cm ² , SET: 1h, VT: 0,030864 h/cm ³ y HT: 0,7 h/cm	35
Tabla 5- 3. Comparación RPD entre algoritmos para CAP: 625 cm ² , SET: 1h, VT: 0,030864 h/cm ³ y HT: 0,7 h/cm	36
Tabla 5- 4. Comparación RPD entre algoritmos para CAP: 625 cm ² , SET: 1h, VT: 0,074074 h/cm ³ y HT: 1,4 h/cm	36
Tabla 5- 5. Resultados algoritmo por superficie (horas)	37
Tabla 5- 6. Resultados obtenidos para el algoritmo de búsqueda local (horas)	38
Tabla 5- 7. Comparativa RPD de los resultados del algoritmo por superficie y el de búsqueda local	39
Tabla 7- 1. Resultados para el algoritmo FIFO (horas).	43
Tabla 7- 2. Resultados para el algoritmo First Fit (horas)	44
Tabla 7- 3. Resultados para el algoritmo por volumen (horas)	45
Tabla 7- 4. Resultados algoritmo ponderado (horas).	46
Tabla 7- 5. Resultados algoritmo por cociente (horas).	47
Tabla 7- 6. Resultados del algoritmo por tiempo de fabricación (horas).	48
Tabla 7- 7. Comparación RPD, capacidad de 1600 cm ² , SET=2h, VT=0,074074 h/cm ³ , HT=1,4 cm/h	49
Tabla 7- 8. Comparación RPD, capacidad de 625 cm ² , SET=2h, VT=0,074074 h/cm ³ , HT=1,4 cm/h	50
Tabla 7- 9. Comparación RPD, capacidad de 625 cm ² , SET=3h, VT=0,074074 h/cm ³ , HT=1,4 cm/h	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Pseudocódigo 3- 1. Algoritmo por Altura	13
Pseudocódigo 3- 2. Algoritmo FIFO	15
Pseudocódigo 3- 3. Algoritmo First Fit	16
Pseudocódigo 3- 4. Algoritmo Por Volumen	17
Pseudocódigo 3- 5. Algoritmo Ponderado	19
Pseudocódigo 3- 6. Algoritmo por Cociente	21
Pseudocódigo 3- 7. Algoritmo por Tiempo de Fabricación	23
Pseudocódigo 3- 8. Algoritmo por Superficie	24
Pseudocódigo 3- 9. Búsqueda local	27

Notación

CAP	Capacidad en superficie de la máquina
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Filament Modeling
FIFO	First In First Out (el primero que entra es el primero en salir)
hmax	Altura máxima
HT	Height time (tiempo por unidad de altura)
i	Índice para los grupos de piezas
j	Índice para la posición de una pieza dentro de un grupo
MJF	Multi-Jet Fusion
PT	Processing Time (tiempo de proceso)
RPD	Relative Percentage Deviation (desviación porcentual relativa)
SET	Set-up time (tiempo de preparación)
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
VM	Volume time (tiempo por unidad volumen)

1 OBJETO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

1.1 Objeto del trabajo

El objeto de este proyecto es proporcionar métodos eficientes para realizar la impresión de una serie de trabajos en una impresora 3D con el objetivo de minimizar el tiempo máximo de terminación de los trabajos.

De esta manera, en este proyecto se ha analizado la asignación de piezas en grupos de fabricación para una sola máquina de fabricación aditiva, con el objetivo final de reducir el tiempo total de fabricación. Para ello, han sido objeto de estudio los parámetros que definen el tiempo de fabricación, con el fin de obtener una asignación lo más eficiente posible.

Para la asignación de piezas, se han propuesto ocho algoritmos. Estos algoritmos se han desarrollado en base a los parámetros que intervienen en el tiempo de fabricación, (Kucukkoc, 2019), o en reglas de despacho ya definidas previamente en la literatura, (Pérez González, Fernández-Viagas Escudero, & Framiñán Torres, 2020). Con el objetivo de obtener el mejor resultado posible, se han comparado estos algoritmos de asignación de piezas en grupos de fabricación y la posterior ordenación de estos grupos en base al tiempo total de fabricación empleado, eligiendo finalmente el que mejores resultados proporciona.

Finalmente, adicionalmente a la proposición de los algoritmos constructivos anteriores, se propone un algoritmo de búsqueda local a partir de uno de estos algoritmos constructivos. Así, se inicia un proceso de búsqueda local, (Pérez González, Fernández-Viagas Escudero, & Framiñán Torres, 2020), con el fin de reducir el tiempo total de fabricación del conjunto de piezas.

1.2 Motivo de la elección de este problema

La fabricación aditiva o comúnmente, impresión en tres dimensiones, ha supuesto una revolución en la manera de producir. Principalmente, su gran innovación consiste en la simplificación de todas las operaciones en una sola máquina, provocando grandes ahorros en coste y espacio. Como toda tecnología incipiente, aún posee aspectos en los que debe mejorar para alcanzar una eficiencia mayor. Uno de los aspectos en los que puede obtener mejores resultados es en el tiempo de fabricación, ya que aún es elevado en comparación con otras tecnologías o métodos de fabricación. Por tanto, mientras no mejoren las prestaciones de las máquinas, es decir, las velocidades de producción de estas, surge la necesidad de optimizar los tiempos de fabricación mediante la organización de aspectos externos a ellas, como pueden ser la organización y asignación de piezas en grupos de piezas.

Adicionalmente, la organización de la producción en máquinas de fabricación aditiva puede impulsar la aplicación de esta tecnología en distintas corporaciones, en sustitución de las tecnologías convencionales. Esta sustitución puede conllevar un ahorro de espacio, tanto para la zona de construcción como en el almacén, y de costes, ya que no serán necesarias tantas máquinas, herramientas y espacio en general.

1.3 Breve descripción de los capítulos del proyecto

El proyecto constará de seis capítulos: Objeto del Trabajo Fin de Grado, Descripción del problema, Análisis del problema y algoritmos propuestos, Experimentación, Resultados obtenidos y Conclusión.

El primer capítulo, “Objeto del Trabajo Fin De Grado”, aborda una introducción del problema elegido para su posterior desarrollo. Adicionalmente, se proporciona una breve descripción del proyecto, expresando cuales han sido los pasos dados para su realización. Posteriormente, se describe el motivo de la elección del problema y la aplicabilidad que puede aportar en un futuro en el mundo corporativo. Finalmente, se describen los capítulos del presente proyecto, con el fin de proporcionar al lector una breve descripción de lo que se encuentra en cada una de las secciones del proyecto.

En el segundo capítulo, “Descripción del problema”, se introducirán las distintas tecnologías de fabricación aditiva. Además, se expondrán las ventajas e inconvenientes de la fabricación aditiva. Posteriormente, se elegirá uno de los aspectos mejorables, el tiempo de fabricación, el cual se desarrollará de una manera más extendida. Adicionalmente, antes de entrar a analizar en profundidad el problema, se introducirá lo que hasta ahora se ha desarrollado en la literatura, exponiendo las soluciones y métodos de los diferentes autores.

En el tercer capítulo, “Análisis del problema y algoritmos propuestos”, se explicarán una serie de datos iniciales que serán necesarios para la resolución. Adicionalmente, se detallará más detenidamente los factores que influyen en el tiempo de fabricación. Finalmente, se explicará en qué consisten tanto los distintos algoritmos constructivos de resolución del problema de asignación y ordenación de los grupos de fabricación, como el algoritmo de búsqueda local, detallándolos paso a paso, además de introducir sus respectivos pseudocódigos, para una mayor comprensión.

El cuarto capítulo, “Experimentación”, introducirá una serie de hipótesis que se han tomado para la resolución del algoritmo. Posteriormente, se detallarán las herramientas elegidas para la aplicación de la metodología.

El quinto capítulo, “Resultados obtenidos”, describirá los resultados obtenidos por los distintos algoritmos constructivos, mostrando una comparación de estos. Posteriormente, comparará los resultados de uno de los algoritmos constructivos, el algoritmo por superficie (3.10), con el algoritmo de búsqueda local (3.11). Así, se detallarán las posibles causas de los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo denominado “Conclusiones”, se expondrán las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización de este proyecto, y las posibles vías de mejora para esta tecnología de fabricación.

Adicionalmente, se expondrán en el “Anexo A. Resultados obtenidos” el conjunto de las tablas de los resultados obtenidos por los algoritmos constructivos que no hayan sido detalladas en el apartado “Resultados obtenidos”.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el anterior capítulo, 1.2, se ha resaltado la revolución que ha supuesto la fabricación aditiva y lo que puede suponer para el mundo corporativo. Por supuesto, aún hay varios aspectos por pulir, en uno de los cuales se enfocará este proyecto. Es por ello por lo que se ha elegido un aspecto mejorable de la fabricación aditiva, como es el tiempo de fabricación, para estudiar vías de mejora de este, como así se indica en el apartado 1.1.

De esta manera, en este capítulo se describirá lo que hasta ahora se ha desarrollado en la fabricación aditiva, analizando los distintos tipos de máquinas que hay en el mercado y cuál es el uso de estas, 2.1. Adicionalmente, se estudiará cuáles son las ventajas e inconvenientes en el uso de este tipo de tecnología, 2.1. Una vez se hayan analizado las ventajas e inconvenientes, se elige el aspecto mejorable en el cual se va a centrar este proyecto, el tiempo total de fabricación, con el propósito de obtener mejores resultados. Adicionalmente, se exponen los estudios previos disponibles en la literatura que abarcan este problema, indicando brevemente las técnicas para solucionarlo que han sido desarrolladas, 2.2. Para la obtención de mejores resultados, se centra la atención en un aspecto clave, como es la superficie de trabajo disponible en la máquina, con el objetivo de obtener la mayor eficiencia posible de esta, 2.3.

2.1 Introducción a la fabricación aditiva

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión en tres dimensiones, es una tecnología de fabricación muy reciente. Se basa en la construcción por adición de material. Dependiendo del material usado, existen numerosas tecnologías de fabricación aditiva.

Así, existen numerosas tecnologías de fabricación aditiva para polímeros y plásticos, como *Fused Filament Modeling (FDM)*, *Stereolithography (SLA)* y *Digital Light Processing (DLP)*. En primer lugar, la tecnología *FDM* es una de las más comunes en la fabricación aditiva para realizar prototipos y piezas personalizadas. Ésta consiste en el depósito de capas de material fundido mediante una boquilla. Así, la boquilla estará a una temperatura mayor a la de fusión del material. En esta tecnología, es necesario el procesamiento de los datos para poder determinar la forma exacta de la pieza, las trayectorias que debe realizar la boquilla y las temperaturas necesarias para la fusión del material, (Kramer, Jordan, Jin, Carroll, & Beese, 2019). En segundo lugar, la tecnología *SLA* también es bastante común en la fabricación aditiva. El proceso llevado a cabo es el de la adición de capas de material, normalmente resina, que solidifican y quedan fijadas mediante luz ultravioleta. Así, el material se depositará en la máquina, de tal manera que cuando se complete una capa, es decir, la luz ultravioleta haya solidificado la parte deseada de material, la superficie de la máquina se desplazará hacia abajo, permitiendo que se añada más resina para formar la siguiente capa, (Bártolo, 2011).

Por último, la tecnología *DLP* consiste en la fabricación de piezas en máquinas de fabricación aditiva en las que el haz para la fijación del material es un proyector de luz digital. Al igual que la anterior, la superficie de construcción en la que se deposita la resina que va a fijarse va descendiendo a medida que las capas se completan. El haz de luz se refleja en un espejo, que lo dirigirá a la posición deseada, (Formlabs, s.f.).

Adicionalmente a las anteriores, existen numerosas tecnologías de fabricación aditiva para metales. En este proyecto, se centra la atención en las tecnologías basadas en el polvo del material: *Selective Laser Sintering (SLS)*, *Selective Laser Melting (SLM)*, *Electron Beam Melting (EBM)*, *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* o *Multi-Jet Fusion (MJF)*. Las cuatro primeras están basadas en el depósito de capas de polvo del material y fijación mediante láser y la última, utiliza en lugar de tecnología láser, tecnología de infrarrojos (Schmid, 2018). En dependencia de la opción de fabricación aditiva elegida de las previamente mencionadas, es posible la utilización de distintos materiales como metal, plástico, cerámica o cristal.

El funcionamiento de los distintos tipos de procesos de fabricación aditiva es relativamente similar. En primer lugar, en tecnologías como *SLM* o *DMLS* es necesario, antes de cada trabajo, el procesamiento de los datos para obtener el diseño de la pieza por capas, (Li, Kucukkoc, & Zhang, Production planning in additive manufacturing and 3D printing, 2017). A continuación, se deposita en una superficie plana una capa del polvo del material. Posteriormente, en las máquinas basadas en la tecnología láser, se fijará este polvo con la forma de la pieza para la capa correspondiente, calentando la superficie deseada. Si se tratara de la tecnología de infrarrojos, se realizaría un calentamiento de la zona deseada mediante esta tecnología. Así, una vez fijada la capa correspondiente, la superficie plana de trabajo descendería por valor de una capa. Finalmente, volvería a depositarse una capa de polvo de material y se repetiría el proceso hasta completar la pieza (Aloui & Hadj-Hamou, 2021).

La diferencia entre las distintas máquinas de fabricación aditiva basadas en la tecnología láser para el calentamiento del material es, precisamente, en la forma de conseguir el mismo, o bien, en la temperatura alcanzada. En las máquinas *SLS*, se utiliza láser de gas como, por ejemplo, el gas de dióxido de carbono, (Schmid, 2018). La diferencia entre la tecnología *SLS* y *SLM* es que la segunda sí llega a fundir el material, mientras que la primera no alcanza la temperatura de fusión. Por otro lado, la fuente de calor de las máquinas *EBM* se trata de un haz de electrones que funde las capas del material, (Yang, y otros, 2017). Esta tecnología está orientada hacia metales tales como el titanio, aleaciones de cobalto o Inco 718. El haz de electrones calienta la zona deseada del material, haciendo que se funda y se fije una vez solidificada.

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 (V., 2020).

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 *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. El problema del *nesting*, se establece en la literatura en varios títulos, como (Li, Kucukkoc, & Zhang, Production planning in additive manufacturing and 3D printing, 2017), el cual lo resuelve mediante la introducción de tolerancias en la superficie ocupada por las piezas en la máquina, o en (Kucukkoc, 2019), el cual también simplifica las geometrías de las piezas para no tener que enfrentarse a un problema, en la mayoría de las ocasiones, irresoluble. 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 organización de las piezas (*scheduling*).

2.2 Problemas abordados previamente en la literatura

La búsqueda de mejores resultados tanto en costes como en tiempo es objeto de estudio en la literatura. Así, el problema de la gestión de las máquinas de fabricación aditiva es bastante reciente puesto que esta tecnología no se ha desarrollado hasta hace poco tiempo. Sin embargo, ha habido diversos estudios de diferentes maneras de agrupación de las piezas para obtener mejores resultados en un problema muy frecuente en esta tecnología: los tiempos de producción. En este apartado, se centrará la atención en los estudios realizados para máquinas de fabricación aditiva en metales.

Así, (Li, Kucukkoc, & Zhang, Production planning in additive manufacturing and 3D printing, 2017) estudió cómo acometer bajas demandas de piezas. En su metodología, se buscaba obtener soluciones diferentes y aceptables. De esta manera, se partía de una pieza elegida aleatoriamente para luego elegir detenidamente el resto. El objetivo final de esta asignación es minimizar el coste de producción medio por unidad de volumen. Para su modelo, se propone resolver mediante procedimientos heurísticos, puesto que el método exacto para su modelo no obtiene resultados en tiempos razonables. Para ello, simplifica bastante la superficie ocupada por las piezas mediante la introducción de tolerancias, evitando tener que considerar un problema de anidado más sofisticado que pudiera resultar de considerar la geometría exacta de las piezas. Adicionalmente, las piezas ya tendrán una orientación predefinida, reduciendo de esta manera la complejidad del problema, al tener que únicamente considerar una orientación por cada pieza. Además, considera únicamente la fabricación mediante un solo material, centrándose en la idea principal de la planificación de la producción. Por otro lado, no se consideran las fechas de entrega, reduciendo también la complejidad del problema. El modelo de asignación de piezas a grupos de trabajo es en base, en primer lugar, a cierta aleatoriedad, al tomar la primera pieza de manera aleatoria, y, en segundo lugar, en base al coste mínimo de producción, eligiendo el resto de las piezas según el mínimo coste para el trabajo en cuestión. Finalmente, en su artículo, se proponen varias vías de mejora para futuras investigaciones. La primera propuesta es la inclusión de las fechas de entrega para obtener resultados más realistas, buscando también obtener el menor coste de producción posible. La segunda propuesta es la de integrar un problema de anidado que considere las geometrías exactas con el objetivo de obtener soluciones más precisas. Finalmente, se propone la elección de más materiales para realizar el estudio.

Posteriormente, (Kucukkoc, 2019) estudia un método exacto para la obtención del tiempo de fabricación para varios modelos: una sola máquina, máquinas paralelas y máquinas no relacionadas. El nivel de dificultad para la resolución del problema para máquinas no relacionadas es considerable, ya que las máquinas tienen velocidades y capacidades distintas, provocando que no todas las piezas puedan ser producidas en cualquier máquina y que una misma pieza se fabrique en tiempos diferentes según la máquina en la que se produzca. En su modelo, determina que, debido a las características de las máquinas, el tiempo de fabricación depende mayormente del volumen y de la altura de las piezas. El objetivo en su modelo es el de minimizar el *makespan*, es decir, el tiempo desde el inicio hasta el fin del proceso de fabricación. Además, debido a la complejidad que se pudiera llegar a alcanzar mediante la utilización para el anidado de la geometría exacta de las piezas, este decide simplificar el anidado mediante geometrías aproximadas, asegurándose que no se sobrepase la capacidad de la máquina. Como en la anterior investigación, también se predefine una orientación

determinada para las piezas. Finalmente, se expone el aumento considerable de la dificultad para resolver el problema según crezca el tamaño de este, proponiendo para investigaciones futuras la incorporación de métodos heurísticos para la resolución. Así, como posibles mejoras para el método de resolución, se propone considerar las fechas de entrega, además de, como en la anterior investigación, la utilización de un procedimiento de anidado considerando las dimensiones exactas de las piezas para la asignación de estas.

Más tarde, (Oh, Witherell, Lu, & Sprock, 2020) estudia los distintos modelos desarrollados en la literatura para elaborar una clasificación de los diferentes problemas de anidado y programación. Así, elabora una descripción detallada de cada uno de los tipos de problema que en su artículo se clasifican. Finalmente, para futuras investigaciones, propone cuatro direcciones de búsqueda: la extensión de la taxonomía, la extensión del modelo de programación, el desarrollo de máquinas de fabricación aditivas más avanzadas y la aplicación de un orden de producción. El desarrollo de máquinas más avanzadas que puedan trabajar con múltiples materiales, láseres o extrusores permitiría que piezas con distintas características (color, material, etc.) pudieran ser asignadas al mismo grupo, al poder producirse simultáneamente en la máquina. Así, finalmente se propone una clasificación de los distintos problemas de anidado y programación de la producción para una mayor facilidad de identificación y organización de los problemas en máquinas de fabricación aditiva.

Finalmente, (Aloui & Hadj-Hamou, 2021) estudia 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.

2.3 Problema en estudio

Una vez que se han mencionados los inconvenientes que surgen en la fabricación aditiva y visto lo desarrollado en la literatura, en este proyecto se centrará la atención en uno de los inconvenientes mencionados, concretamente el tiempo de fabricación. Cada vez que se quiera producir una pieza, conlleva un tiempo de preparación de la máquina, como puede ser la preparación del archivo, la limpieza de la máquina o el relleno de material (Aloui & Hadj-Hamou, 2021). Por supuesto, adicionalmente al tiempo de preparación será necesario un tiempo de producción, para finalmente necesitar un tiempo de acabado o enfriamiento de las piezas. Obviamente, si la producción se basa en la fabricación pieza a pieza, los tiempos aumentarán exponencialmente, puesto que hasta que una pieza no haya terminado, no podrá empezar la siguiente. Es por ello por lo que, en este proyecto, se buscará aprovechar al máximo la superficie de la máquina, buscando que, de una sola preparación de la máquina, se fabriquen varias piezas simultáneamente, reduciendo así el tiempo de fabricación.

Claramente, la manera de agrupar las piezas será un factor determinante en el tiempo de fabricación. Así, en este proyecto, se buscará optimizar la totalidad del tiempo de fabricación de un conjunto de piezas dado. Para ello, será necesario estudiar las características tanto de las piezas como de la máquina.

En este proyecto, como se detalla más detenidamente en el apartado 3.2, el tiempo de fabricación se obtiene de la fórmula obtenida por (Kucukkoc, 2019). Así, se distinguen tres tiempos a tener en cuenta: el tiempo de preparación de la máquina, el tiempo por unidad de volumen de material y el tiempo por unidad de altura de la pieza. Por un lado, el tiempo de preparación de la máquina será el que resulte de distintas tareas, como son el abastecimiento de material en polvo a la máquina, la limpieza de la máquina o la preparación del archivo, como indica (Aloui & Hadj-Hamou, 2021). Por otro lado, el tiempo por unidad de volumen de material será el que emplee la máquina en fijar una cantidad de material determinada. Finalmente, el tiempo por unidad de altura de la pieza es el relativo al número de capas que deberá procesar la máquina.

3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA Y ALGORITMOS PROPUESTOS

En el anterior capítulo, 2, una vez introducida la fabricación aditiva y descrito sus principales ventajas e inconvenientes, se eligió un aspecto de mejora en el cual se va a centrar este proyecto, el tiempo de fabricación. Adicionalmente, se introdujo lo que se ha desarrollado en la literatura hasta ahora con relación a la búsqueda de mejorar este aspecto seleccionado.

Así, en el presente capítulo, se centrarán los estudios en el problema elegido en el capítulo 2.3. Así, antes de comenzar a aplicar técnicas para resolver el problema, se introducen unos datos iniciales que serán necesarios para la resolución, 3.1. Para poder realizar una mejora del tiempo de fabricación, primeramente, se deberá analizar con detenimiento cuáles son los factores que afectan a este. De esta manera, se introduce la fórmula para la obtención del tiempo de fabricación en la cual se va a apoyar este proyecto, 3.2. Finalmente, se incluye la descripción de los algoritmos desarrollados para la resolución del problema de asignación de piezas a grupos de fabricación, además de incluir sus respectivos pseudocódigos.

3.1 Datos iniciales

Inicialmente, cada pieza tendrá una serie de datos asociados. Se tendrá, primeramente, la identificación numérica de la pieza, que consistirá en un número entero positivo. En segundo lugar, se tendrá la superficie que ocupa la pieza en la máquina, que vendrá dada en centímetros cuadrados. En tercer lugar, se obtiene la altura de la pieza, medida en centímetros. Por último, se tendrá el volumen de la pieza, medido en centímetros cúbicos, (Li, Kucukkoc, & Zhang, ORE-Repository, 2015).

Adicionalmente, serán necesarios una serie de datos de la máquina con la que se trabaje. En primer lugar, será necesaria la superficie disponible de la máquina. En segundo lugar, dependiendo de la máquina, se tendrán los valores del tiempo de preparación, *SET*, el tiempo por unidad de volumen, *VT* y el tiempo por unidad de altura, *HT*. Por último, será necesario también la altura máxima que puede alcanzar la máquina, que determinará la altura máxima de las piezas que puede fabricar, (Li, Kucukkoc, & Zhang, ORE-Repository, 2015).

En los algoritmos, los grupos de piezas se verán representados en una matriz, donde cada fila representará a un grupo de piezas. La posición de las piezas dentro de una fila no será relevante. Inicialmente, la matriz vacía contará con todos sus valores como “-1”, que se irán cambiando por la identificación numérica de la pieza que se asigne al grupo. El valor “-1”, por tanto, representa una posición vacía.

3.2 Análisis del cálculo del tiempo de fabricación

Si la composición de los grupos de piezas se va a determinar en vistas a obtener el menor tiempo total que sea posible, es clave analizar detenidamente en qué se basa el tiempo de fabricación. En este proyecto, se ha determinado que la fórmula (Ecuación 1) para la obtención del tiempo de fabricación propuesta por (Kucukkoc, 2019) es bastante realista, puesto que tiene en cuenta los tres factores claves para la obtención del tiempo de fabricación: el tiempo de preparación, el tiempo por cada unidad de volumen de material y el tiempo por cada unidad de altura de la pieza.

El valor del tiempo de fabricación o tiempo de proceso de un grupo de piezas, medido en horas, se indicará con las siglas “PT”, abreviatura del inglés *Processing Time*. Este valor será siempre un número positivo real o nulo. Para indicar el número del grupo del cual se obtiene el tiempo de fabricación se usa la letra “j”, pudiendo tomar esta cualquier número entero positivo. Así, para el cálculo del tiempo de proceso, se diferencian tres sumandos.

El primer sumando es el relativo al tiempo de preparación de la máquina. Cada vez que la máquina vaya a procesar una serie de piezas, deberá ser preparada. El tiempo de preparación dependerá principalmente de la máquina. El tiempo de preparación se representa en la fórmula como “SET”, del inglés *Set-up time*. Este valor, al igual que el tiempo de proceso, estará expresado en horas. Obviamente, el cálculo del tiempo de fabricación de un grupo, y por ende, del tiempo de preparación, solo se llevará a cabo si, efectivamente, hay piezas asignadas al grupo en cuestión. Así, para determinar si se debe calcular el tiempo de preparación, se realiza el producto de este tiempo por una variable binaria “z”, que será de valor unidad si el grupo tiene asignada alguna pieza. En caso de que no haya piezas asignadas al grupo, este valor quedará como nulo.

El segundo sumando hace referencia al tiempo empleado para procesar cada unidad de volumen del material. La velocidad de la máquina por cada unidad de volumen vendrá expresada por las siglas “VT”, del inglés *Volume Time*. Para completar la totalidad de la pieza, se debe procesar la totalidad de su volumen. Por tanto, para completar todas las piezas correspondientes a un grupo, será necesario procesar todo el volumen de las piezas del grupo, que se expresará mediante la expresión del sumatorio de los volúmenes individuales de cada pieza, v . La referencia a la pieza en cuestión se realizará mediante el subíndice i , que tendrá el valor numérico de la identificación de la pieza. Así, para determinar exactamente el volumen de una pieza, se utilizan las siglas v_i . Al recorrer este sumatorio la totalidad de las piezas, es necesario añadir un valor que cause que únicamente se contabilicen las piezas asignadas al grupo en cuestión. Este valor será la variable binaria X_{ji} , que será de valor unidad únicamente si la pieza i es asignada al grupo j . En caso contrario, será nula. Así, el sumatorio resultante será el producto del volumen de unas piezas en concreto por el valor unidad si pertenecen al grupo estudiado.

Finalmente, el último sumando de la fórmula es el correspondiente al tiempo por unidad de altura de la pieza. El tiempo que emplee la máquina en producir cada capa será el que determine este valor. De esta forma, se expresa en la fórmula como “HT”, del inglés *height time*. Este valor estará medido en horas por centímetro. Según la fórmula empleada por (Kucukkoc, 2019), este tiempo solo dependerá de la pieza más alta del grupo, puesto que el resto de las piezas, al ser más bajas, estarán ya consideradas dentro de la altura de la pieza más alta, al haber sido sus capas ya depositadas. Esto está considerado en la fórmula como el valor máximo, max , de todas las alturas individuales de cada pieza, multiplicado por el valor binario usado anteriormente para el volumen, X_{ji} , que determinará si la pieza pertenece o no al grupo.

La fórmula para la obtención del tiempo de fabricación dada por (Kucukkoc, 2019) es la siguiente:

$$PT_j = SET * z_j + VT * \sum_{i \in I} v_i * X_{ji} + HT * \max\{h_i * X_{ji}\}$$

Ecuación 1

3.3 Algoritmo por Altura

Una vez se han descrito los datos iniciales que se obtienen y la fórmula para la obtención del tiempo de

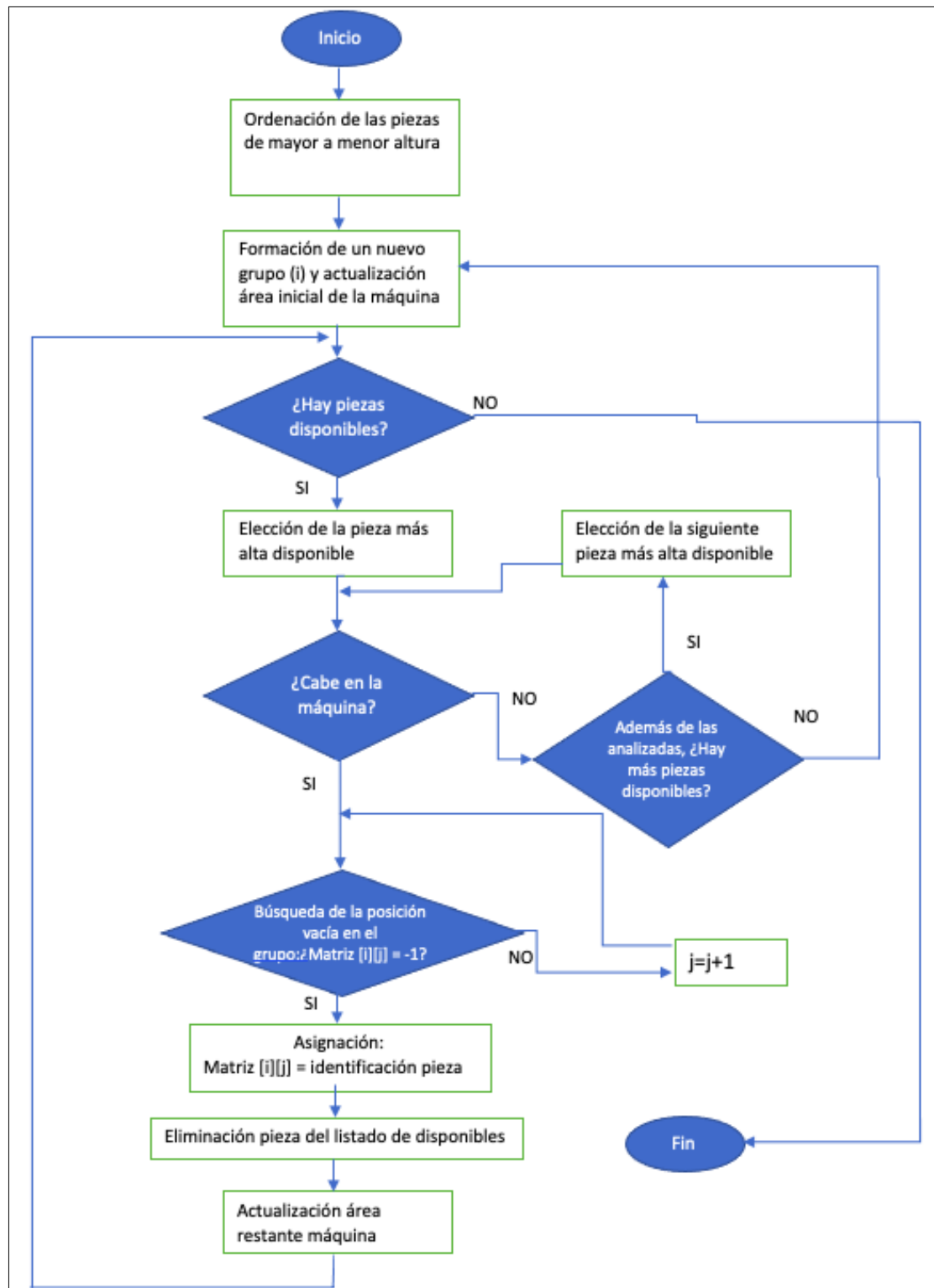
fabricación, se procede a asignar las piezas a los grupos. Para ello, se propone un algoritmo cuyas piezas están ordenadas de mayor a menor altura.

En primer lugar, se guardan los datos de las características de las piezas en vectores. Cada dato se guardará en un vector diferente, con el nombre del dato guardado. Además, será necesario una matriz cuadrada, del tamaño del número de piezas que se van a asignar. Como en el momento inicial la matriz estará vacía, se definen sus valores iniciales como “-1”. Cada fila de la matriz representará un grupo de piezas. El orden de las piezas dentro de una misma fila en la matriz no es relevante.

El primer paso dado por el algoritmo será el de ordenar las piezas de mayor a menor altura. Mediante este paso, se otorga al algoritmo un orden de preferencia de elección de piezas. Así, se inicia el bucle de asignación de piezas. Cada vez que se comience a asignar piezas a un nuevo grupo, se actualizará la capacidad en superficie disponible de dicho grupo a la capacidad de la máquina. El algoritmo buscará entre el listado de piezas la más alta que quepa en el grupo. La manera de comprobar si cabe o no en el grupo es, básicamente, comprobar que el área disponible en la máquina sea mayor o igual al área que ocupa la pieza en cuestión, además de verificar que la altura de la pieza sea menor que la máxima altura que pueda fabricar la máquina. Cada vez que una pieza se incluya en el grupo, se actualizará el área restante disponible, simplemente restándole a esta, la superficie de la pieza. Como se ha dicho anteriormente, cada grupo corresponde a una fila de la matriz. Sin embargo, la posición de la pieza dentro del grupo no es relevante, por tanto, se asignará a la primera posición que esté disponible, cambiando el valor original, que será “-1”, por la identificación de la pieza. Para mayor dinamismo del algoritmo, se cambia la altura de la pieza en el vector de alturas a cero para que no pueda ser escogida, ya que originalmente se estableció la condición de que la pieza solo podía ser escogida si tenía una altura mayor que cero. En el momento que no haya más piezas asignables a un grupo, se pasará a la asignación del grupo siguiente, obviamente actualizando la superficie disponible en la máquina. El algoritmo finalizará cuando no haya más piezas disponibles.

Por último, una vez obtenida la asignación de todas las piezas, se calcula el tiempo de fabricación. Para ello, en cada grupo se sumará el tiempo de preparación, el producto de la suma de volúmenes de las piezas del grupo y la velocidad por unidad de volumen de la máquina y, finalmente, se sumará el producto de la velocidad por unidad de altura de la máquina por la pieza más alta del grupo.

En el Pseudocódigo 3- 1 se puede observar un esquema de la aplicación del algoritmo. En él, se representa de manera genérica el proceder del algoritmo. Así, inicialmente ordena las piezas según la altura. Posteriormente, comienza la iteración, en la cual se elige primeramente la fila, que representa a un grupo de piezas, en la cual se asignarán las piezas y se determina el área restante en la superficie de la máquina. Para la asignación de las piezas, se comprueba que el área de la pieza sea menor o igual que la superficie restante en la máquina. En tal caso, se asigna a la primera posición vacía en la fila, se actualiza la superficie restante en la máquina y se elimina la pieza de las disponibles. Si una pieza no cupiera en la máquina, se comprobaría si hay más piezas por asignar. En caso afirmativo, se elige la siguiente pieza más alta y, en caso negativo, se elige el siguiente grupo de asignación, con su correspondiente actualización a la superficie de la máquina original. Finalmente, en el momento en que no haya más piezas disponibles, finaliza la iteración.

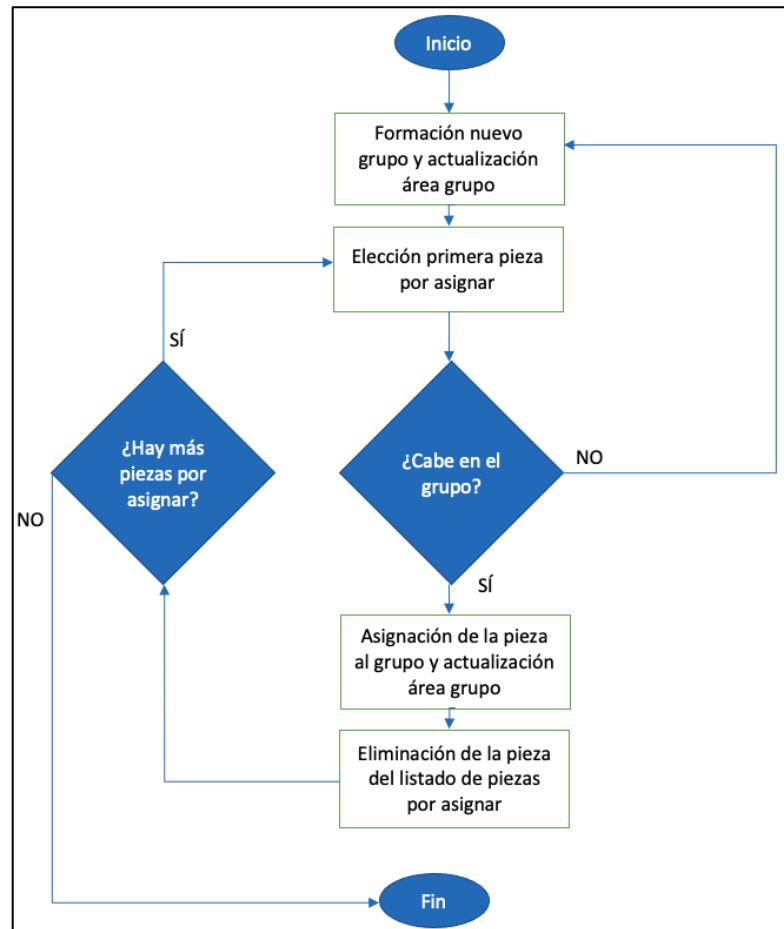


Pseudocódigo 3- 1. Algoritmo por Altura

3.4 Algoritmo FIFO

En segundo lugar, se desarrolla el algoritmo más básico, el conocido como *First In First Out*, con sus siglas *FIFO*, Pseudocódigo 3- 2. *FIFO* es una regla de despacho, (Pérez González, Fernández-Viagas Escudero, & Framiñán Torres, 2020), que equivale al hecho de no aplicar ninguna gestión de optimización en la asignación de piezas. Así, este algoritmo toma la primera pieza disponible que quepa en la máquina, sin seguir más que el orden de llegada de las piezas, equivalente en este caso al orden ascendente por identificación numérica. En el momento que se encuentre una pieza que no quepa en el grupo, el algoritmo cerrará el grupo de asignación y comenzará la asignación del siguiente. Como se ha dicho en el punto anterior, 3.3, los grupos serán equivalentes a las filas de la matriz, y la posición de una pieza dentro de la fila no es relevante. Por tanto, es un algoritmo bastante ineficiente ya que habrá muchos grupos con un espacio disponible bastante amplio sin aprovechar. Se escoge comparar con este algoritmo puesto que es el equivalente a no planificar la asignación de piezas para colocarlas en la máquina. La diferencia de resultados de este algoritmo con el algoritmo por altura, 3.3, es ostensible, siendo esta mayor cuanto mayor tamaño tenga la instancia.

En el Pseudocódigo 3- 2, se explica de manera genérica y visual el procedimiento del algoritmo. Así, el primer paso es el del inicio de la formación de un nuevo grupo, es decir, se selecciona la primera fila vacía disponible en la que se incorporarán las piezas asignadas, además de actualizar la superficie disponible en la máquina a la de la máquina. A continuación, se elige la primera pieza que no haya sido asignada con anterioridad con el menor valor de identificación numérica, que es el orden de elección por el que se rige este algoritmo. Si esta pieza elegida dispone de un área menor al disponible, se asignará al grupo en la primera posición de la fila que esté vacía. En caso contrario, será necesario ver si hay más piezas por asignar, que, en caso positivo, se procederá al primer paso dado, es decir, la selección para la asignación de la siguiente fila vacía de la matriz. En el caso de que sí se pudiera asignar la pieza al grupo, se deberá actualizar la superficie restante en la máquina y se quitará la pieza del listado de piezas por asignar. Finalmente, si una vez asignada la pieza, hubiera más piezas por asignar, se continuaría con la siguiente pieza. En caso contrario, finalizaría el algoritmo.

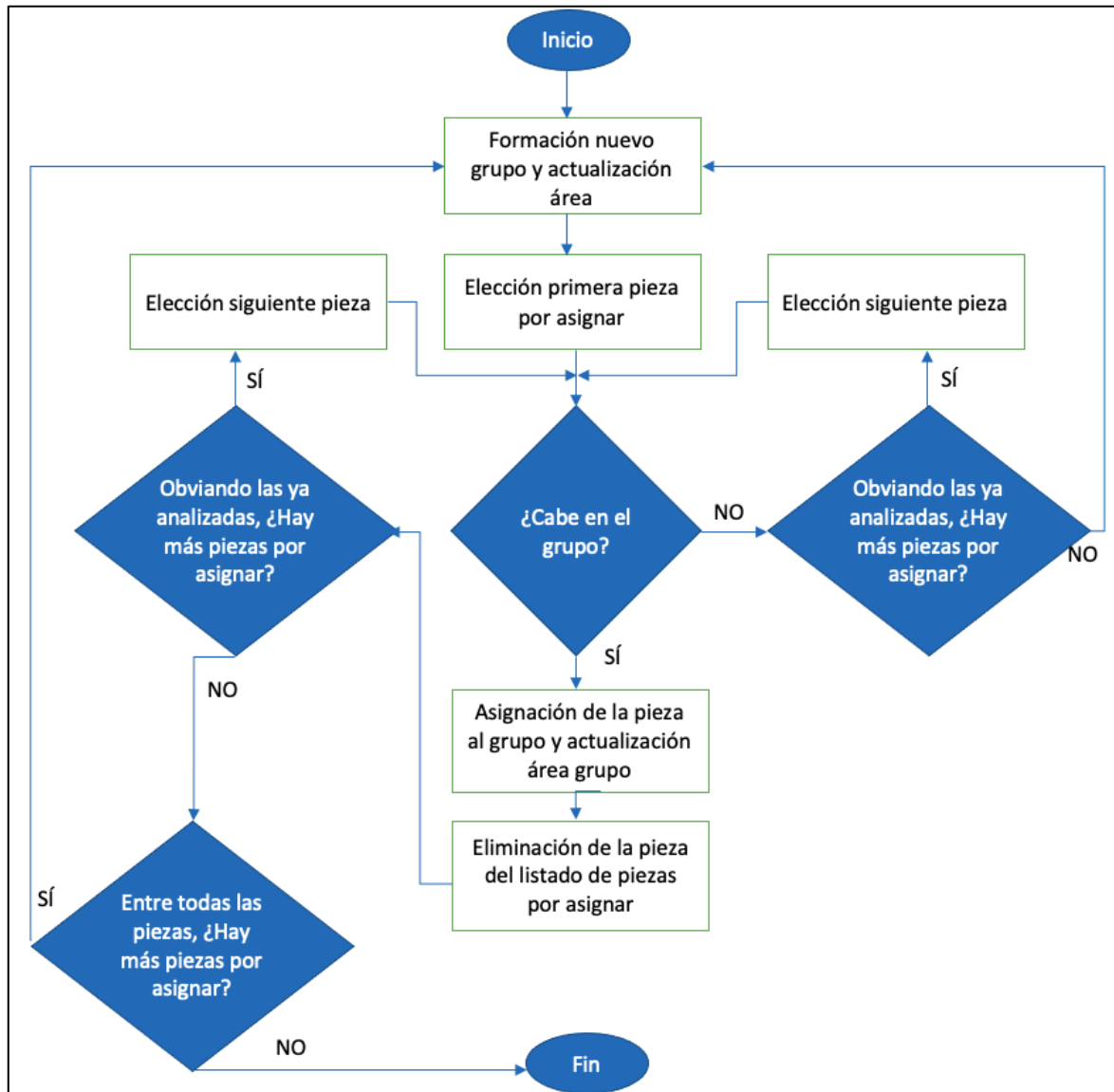


Pseudocódigo 3- 2. Algoritmo FIFO

3.5 Algoritmo First Fit

En tercer lugar, se desarrolla el algoritmo conocido como *First Fit*, Pseudocódigo 3- 3. Está basado en la regla de despacho del mismo nombre. Este algoritmo es bastante similar al anterior, con la salvedad que este sí busca hasta encontrar una pieza que quepa en la máquina. Así, irá incorporando piezas siguiendo el orden ascendente de la identificación numérica, hasta no encontrar ninguna pieza que quepa. En el momento que no encuentre ninguna pieza, se cerrará el grupo y creará otro. Finalizará cuando no haya ninguna pieza más por asignar. La elección de este caso se debe a modificar en parte al algoritmo anterior con un paso más de planificación, ya que parece más probable buscar incorporar más piezas en la máquina. En este caso, las diferencias en los resultados con respecto al algoritmo por altura, 3.3, son algo más reducidas, aunque el algoritmo por altura posee mejores resultados.

En el Pseudocódigo 3- 3, se explica de manera genérica y visual el procedimiento del algoritmo. De esta manera, se comienza con la selección de la fila de la matriz, es decir, del grupo, en el que se estudiarán asignar las piezas. Seguidamente, se escoge la primera pieza a asignar, que será la del menor valor de identificación numérica de las disponibles. Si dispone de un área menor o igual a la disponible en la máquina, se introduce en el grupo y se elimina del listado de piezas disponibles. En caso contrario, se estudia si hay más piezas asignables además de las ya analizadas y en tal caso, se procede a introducir la siguiente pieza disponible. Si al asignar la pieza, no hubiera más piezas por asignar, finaliza el algoritmo. En caso de que sí haya más piezas por asignar, se toma la siguiente pieza disponible.



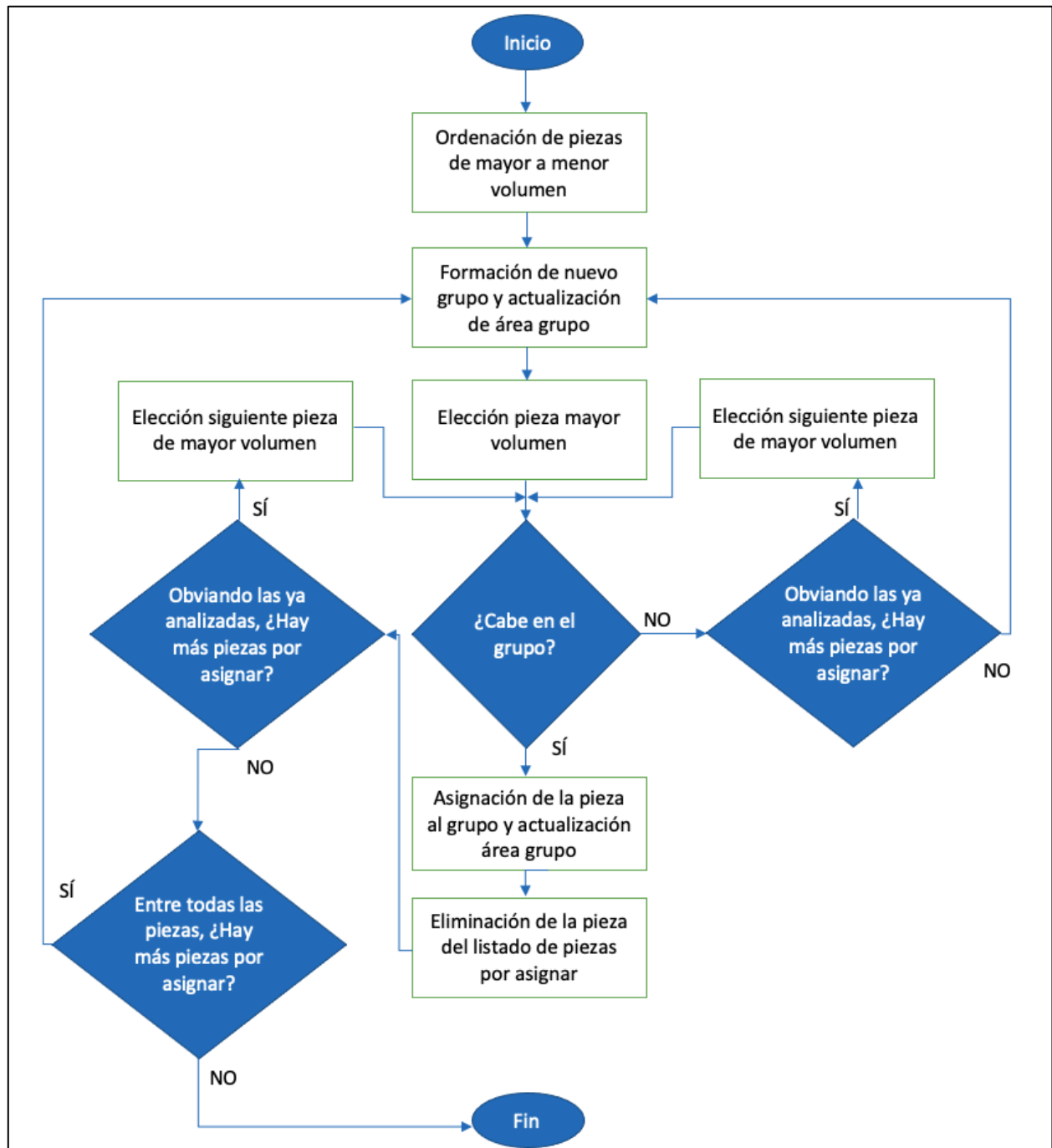
Pseudocódigo 3- 3. Algoritmo First Fit

3.6 Algoritmo por Volumen

En cuarto lugar, se diseña un algoritmo en el cual las piezas están ordenadas de mayor a menor volumen, Pseudocódigo 3- 4. De esta forma, el algoritmo irá seleccionando la pieza que mayor volumen tenga de las que quepan en la máquina. Como en los anteriores, el algoritmo comenzará a asignar piezas al siguiente grupo cuando no encuentre piezas con la superficie lo suficientemente pequeña como para que pueda ser asignada al grupo. La elección del diseño de este algoritmo se debe a buscar un algoritmo basado en lo que, como se ha dicho anteriormente, marcará el tiempo de fabricación, que es el volumen de las piezas.

En el Pseudocódigo 3- 4, se explica de manera genérica y visual el procedimiento del algoritmo. El primer paso dado por el algoritmo es el de la ordenación en un vector de las piezas de mayor a menor volumen. Una vez ordenadas, comienza la iteración con la elección de la primera fila vacía de la matriz en la cual se van a asignar las piezas. Por supuesto, se establece la superficie disponible en la máquina como la original de esta. Así, se toma la pieza de mayor volumen que quede por asignar. Si la pieza cabe en la máquina, se asigna a la primera posición vacía, se actualiza el área disponible en la máquina y se elimina la pieza del listado de piezas por asignar. En caso contrario, se comprueba si, además de la recién analizada, hay más piezas por asignar. En caso afirmativo, se elige la siguiente pieza de mayor volumen disponible. Si no hubiera más piezas, se comenzará a asignar en la siguiente fila, con su correspondiente actualización de superficie disponible. En el

caso de que después de asignar una pieza, no hubiera más piezas disponibles, el algoritmo finalizaría. En caso de que sí hubiera más piezas, se elegiría la siguiente pieza de mayor volumen disponible.



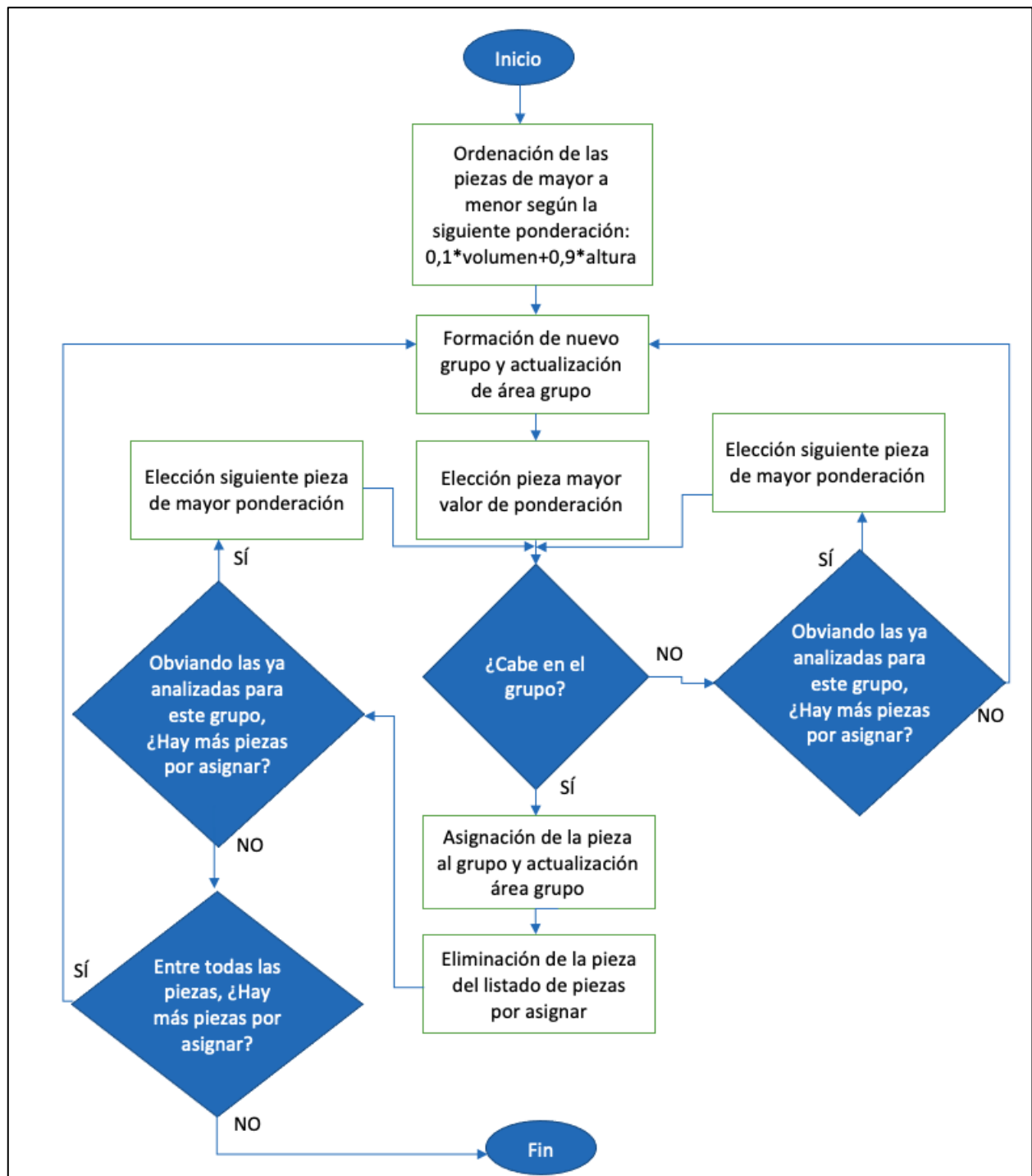
Pseudocódigo 3- 4. Algoritmo Por Volumen

3.7 Algoritmo Ponderado

En quinto lugar, se realiza un algoritmo que incluya en parte el volumen y la altura de las piezas, Pseudocódigo 3- 5. Debido a la diferencia de órdenes de magnitud de estas dos medidas, se realizará una ponderación. Asimismo, se crea un vector que contendrá la suma ponderada de la altura y el volumen. Esta suma será la equivalente de ponderar en un 10% el volumen de las piezas y el resto, en la altura. Si se propusiera un mayor porcentaje de ponderación para el volumen, coparía totalmente el valor de la ponderación, debido a su elevado valor numérico respecto a la altura. Por tanto, se escoge asignar como valor para la ponderación el 10% al volumen para que la altura sí pueda hacer variar el orden de la ponderación. Una

vez obtenido el resultado de esta suma, se ordenarán de mayor a menor estos valores, marcando el orden de preferencia de las piezas para asignarlas a los grupos. El algoritmo buscará incorporar las piezas en un grupo hasta que no encuentre ninguna que quepa en la máquina, momento en el que se empezarán a asignar las piezas en el grupo siguiente, habiendo debidamente actualizado el área disponible en la máquina. El algoritmo finalizará cuando no haya más piezas disponibles para incorporar a un grupo. La elección de este algoritmo busca incorporar los valores del volumen y la altura en la elección, y no únicamente uno de ellos, como en el algoritmo por altura o por volumen.

En el Pseudocódigo 3- 5, se explica de manera genérica y visual el procedimiento del algoritmo. Primeramente, se ordenan las piezas de mayor a menor ponderación. La ponderación tomada es la suma de la décima parte del volumen y el noventa por ciento de la altura. Así, se inicia la iteración mediante la elección de la primera fila vacía de la matriz en la cual se asignarán las piezas y la actualización de la superficie disponible en la máquina, siendo la original de esta. Seguidamente, se toma la pieza de mayor ponderación y se comprueba si su área es menor o igual a la disponible en la máquina. En tal caso, se asigna a la fila correspondiente, se actualiza la superficie disponible en la máquina y se elimina del listado de piezas por asignar. Posteriormente, se comprueba si hay más piezas por asignar. En caso afirmativo, se toma la siguiente pieza disponible de mayor ponderación. En caso negativo, finaliza el algoritmo. Si una pieza elegida no cabe en la máquina, se comprueba si hay más piezas por asignar, que en tal caso se procede a elegir la siguiente de mayor ponderación. En caso de que no hubiera más piezas por asignar, se inicia la asignación de piezas a la siguiente fila, con su correspondiente actualización de superficie disponible.



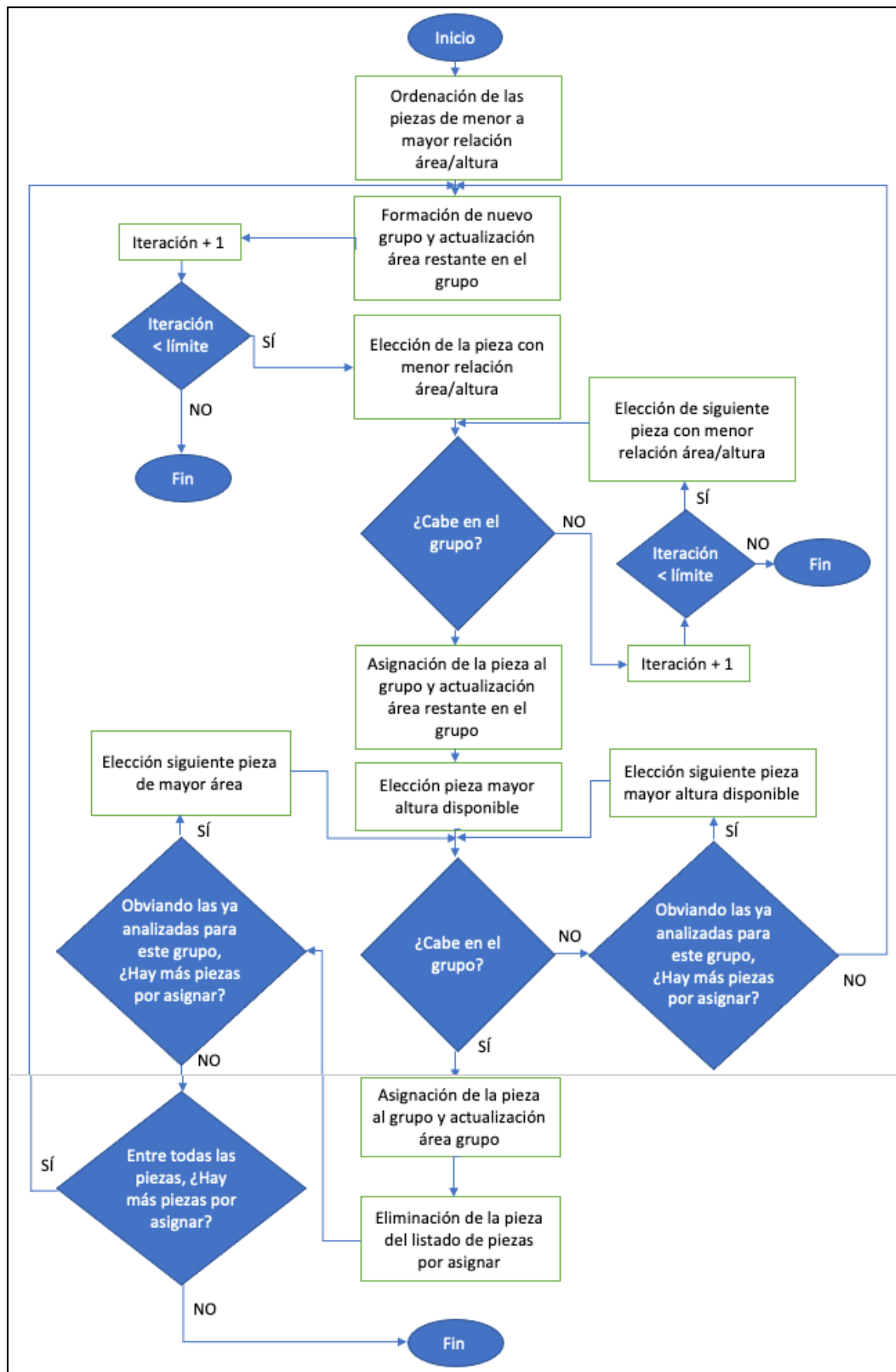
Pseudocódigo 3- 5. Algoritmo Ponderado

3.8 Algoritmo por Cociente

En sexto lugar, se diseña un algoritmo con dos pasos, Pseudocódigo 3- 6. Por un lado, se realiza el cociente entre la superficie de las piezas y su altura. Estos valores se ordenarán de menor a mayor. Así, la primera pieza asignada al grupo será la de menor valor de los mencionados. El objetivo de este paso es incorporar piezas con una relación entre su área y su altura interesante, principalmente con la intención de que piezas altas con poca superficie sean las primeras opciones. Por otro lado, como en el algoritmo diseñado, se ordenan las piezas de mayor a menor altura. Mediante este paso, se busca que las siguientes piezas incorporadas al grupo sean altas. Si se diera el caso de que la pieza elegida en el primer paso sea más alta que las posteriores, podría causar un buen ahorro de tiempo, puesto que este conjunto de piezas altas elegidas posteriormente no marcará el tiempo

total de fabricación.

Para una visión más conceptual, se adjunta el Pseudocódigo 3- 6. En primer lugar, se ordenan las piezas de menor a mayor relación entre área y altura. En segundo lugar, se elige la primera fila de la matriz vacía para asignar piezas y se actualiza el área disponible en la máquina a la original. Posteriormente, se suma un valor a la iteración y si este es mayor al límite de iteraciones, finalizará el algoritmo. La pieza elegida será la de menor relación área-altura. Así, se comprueba si su superficie es menor o igual a la disponible en la máquina, y en caso negativo, se añade un valor de iteración y se toma la siguiente pieza si no se ha alcanzado el límite de iteraciones. En caso de que sí pueda ser asignada al grupo, se actualizará el área disponible en la máquina y a continuación, se procede a elegir las piezas de mayor a menor altura. Por supuesto, siempre que se elija una pieza para asignar al grupo, se comprueba si cabe en el mismo. En caso afirmativo, se introduce y se actualiza el área restante. Si una vez asignada una pieza a un grupo, hubiera más piezas por analizar, se tomaría la siguiente de más altura y en caso contrario, finalizaría el algoritmo. En caso de que la pieza no cupiera en el grupo, se toma la siguiente pieza si hubiera más piezas por asignar además de las ya analizadas. En el caso de que ya no hubiera más piezas por asignar a parte de las ya analizadas, se comenzaría la asignación a un nuevo grupo, volviendo al segundo paso dado por el algoritmo.

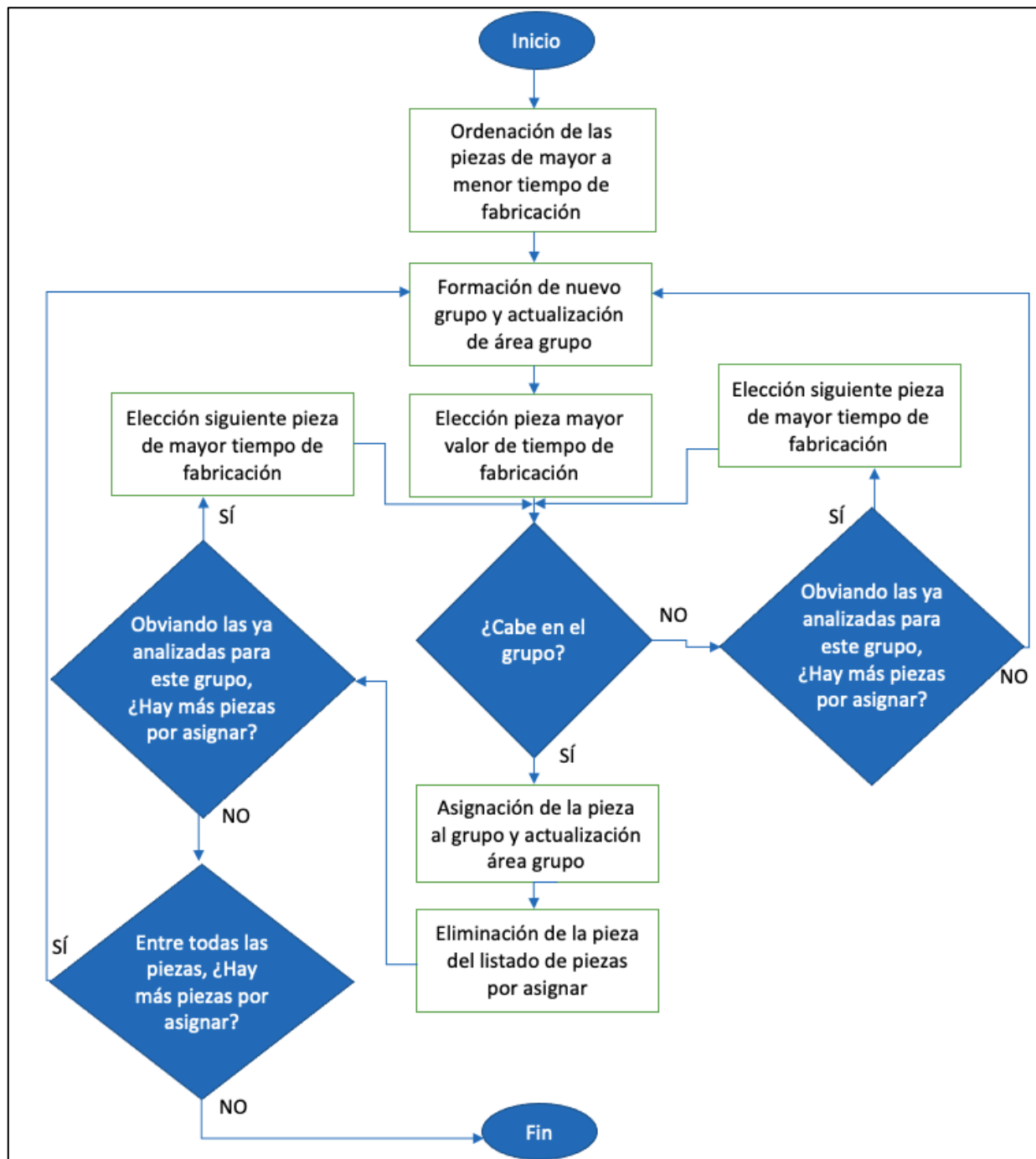


Pseudocódigo 3- 6. Algoritmo por Cociente

3.9 Algoritmo por Tiempo de Fabricación

En séptimo lugar, se propone un algoritmo en el cual el orden de preferencia de las piezas se basará en el tiempo individual de fabricación que tendrían si fueran las piezas que marcaran la altura del grupo, Pseudocódigo 3- 7. De esta manera, el primer paso será el de calcular los tiempos de fabricación de cada pieza. Para el cálculo de estos tiempos, no se tendrá en cuenta el tiempo de preparación, puesto que al ser el mismo siempre, no variará el resultado. Una vez obtenidos todos estos tiempos, se ordenarán de mayor a menor. Finalmente, el algoritmo incorporará las piezas según esta ordenación hasta que no encuentre ninguna que pueda introducirse en el grupo. En el caso de que no encuentre piezas disponibles, pasará a un nuevo grupo. El algoritmo finalizará cuando no haya más piezas que asignar. La elección de este algoritmo se basa en mayor medida a la incorporación a la decisión de prácticamente todos los factores de decisión, es decir, el volumen y la altura de las piezas y las velocidades de la máquina.

De manera más visual, se indica en el Pseudocódigo 3- 7 el funcionamiento de este algoritmo. Así, en primer lugar, se ordenan las piezas de mayor a menor tiempo de fabricación individual. Posteriormente, se elige la fila en la cual se van a asignar las piezas y se actualiza la superficie disponible en la máquina. Seguidamente, se toma la pieza de mayor tiempo de fabricación y, si cabe en la máquina, se asigna al grupo y se actualiza la superficie disponible en la máquina. Seguidamente, se comprueba si hay más piezas por asignar, que en caso positivo, se toma la siguiente pieza de mayor tiempo de fabricación. En caso de que no hubiera más piezas por asignar, finaliza el algoritmo. Si la pieza elegida no cupiera en la máquina, se comprueba si hay más piezas por asignar. Si es así, se elige la siguiente pieza de mayor valor de tiempo de fabricación y, si no hay, se inicia la asignación al siguiente grupo.



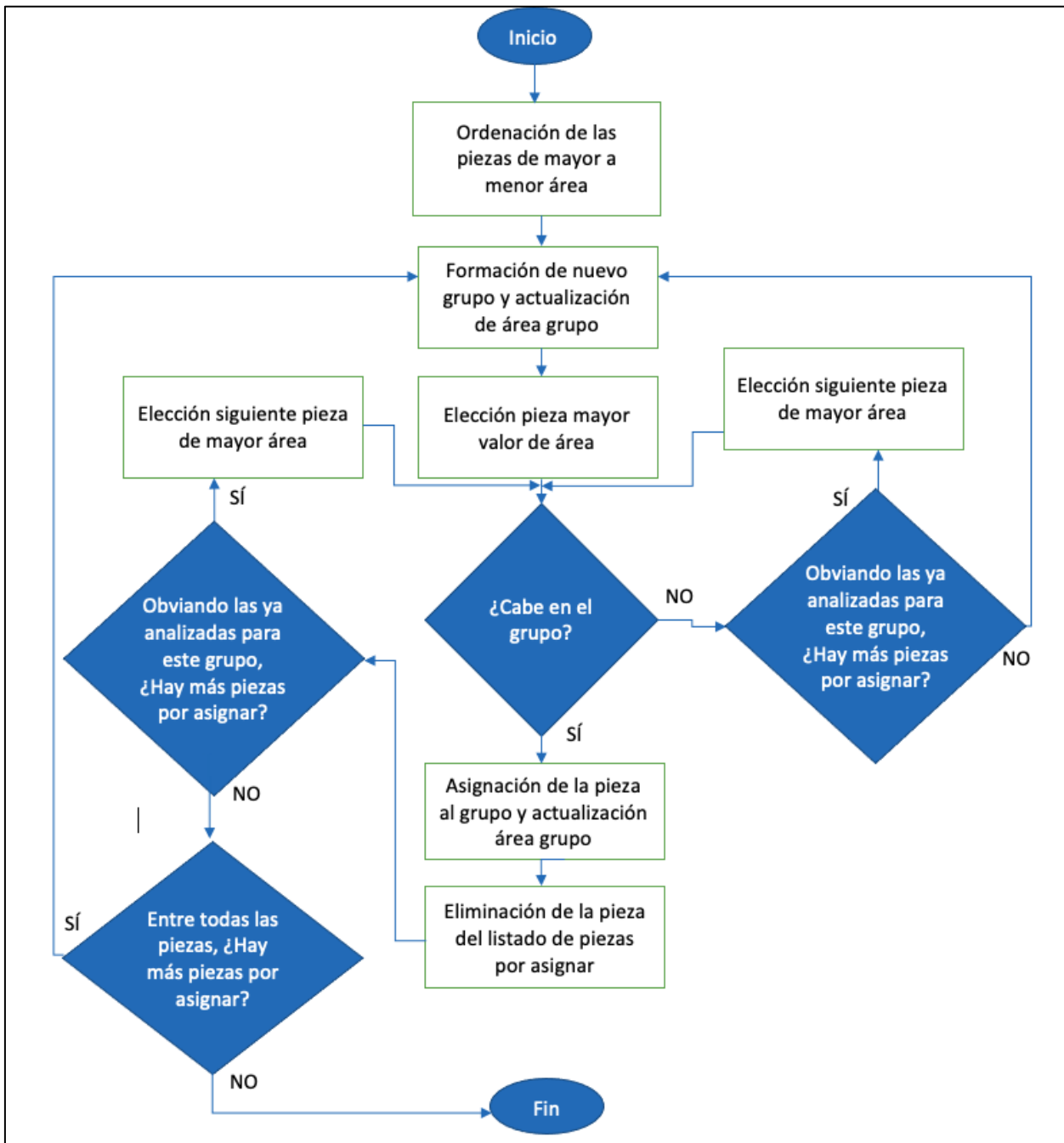
Pseudocódigo 3- 7. Algoritmo por Tiempo de Fabricación

3.10 Algoritmo por Superficie

En octavo lugar, se propone un algoritmo en búsqueda de basar la elección en el tiempo de preparación, Pseudocódigo 3- 8. Para que esto ocurra, se debe basar la elección en la superficie de las piezas, buscando formar el mínimo número de grupos posible, puesto que este tiempo se computaría una cantidad de veces inferior. Por tanto, se ordenan las piezas de mayor a menor superficie y se elegirán según esta ordenación. Así, el algoritmo siempre buscará ajustar al máximo cada grupo, buscando la pieza con mayor superficie que quepa en la máquina.

Con el objetivo de obtener una visualización conceptual del algoritmo, se adjunta el Pseudocódigo 3- 8. El primer paso tomado es el de ordenar las piezas de mayor a menor área. A continuación, se elige la pieza de mayor área disponible, comprobando si efectivamente cabe en el grupo. En caso afirmativo, se asigna y se

actualiza el área restante. Si hay más piezas por asignar, se toma la siguiente pieza de mayor área disponible. En caso de que no hubiera más piezas, finaliza el algoritmo. Si la pieza originalmente no cupiera en el grupo, se comprobaría si hay más piezas disponibles y en tal caso, se tomaría la siguiente. Si no hubiera más piezas disponibles, se comenzaría la asignación del siguiente grupo.



Pseudocódigo 3- 8. Algoritmo por Superficie

3.11 Algoritmo de Búsqueda Local

En último lugar, se propone un algoritmo de búsqueda local, (Pérez González, Fernández-Viagas Escudero, & Framiñán Torres, 2020). A causa de la diferencia del orden de magnitud de los valores de los que depende la variación del tiempo total de fabricación, es decir, la altura máxima de cada grupo y el número de grupos, resulta complejo obtener mejoras a partir del algoritmo que mejores resultados proporciona, el algoritmo por

altura (3.3). Esta complejidad se debe a que, en mayor parte, la altura máxima de cada grupo será la que determinará una posible reducción del tiempo total de fabricación. Así, una posible reducción del número de grupos no causa una mejora del tiempo muy significativa, debido a que el orden de magnitud del tiempo por altura es mucho mayor que el tiempo de preparación. Además, normalmente, en el algoritmo por altura, la pieza que esté asignada a unos de los últimos grupos, que ocuparán el menor espacio en la máquina, será de las más bajas, haciendo que una posible mejora evitando tener que contabilizar su altura, es decir, buscando incorporar las piezas de los grupos más pequeños en otros, no sea muy determinante en el resultado final.

De este modo, se propone obtener mejoras a partir de un algoritmo que no esté tan enfocado en un aspecto tan importante como la altura, sino en el otro factor de mejora, es decir, el tiempo de preparación y, por ende, el número de grupos: el algoritmo por superficie (3.10). Se elige este ya que, a priori, se ha obtenido la asignación de piezas en el menor número de grupos posibles. Como se expresa en la primera línea del párrafo, este algoritmo prioriza la elección por superficie, no respondiendo a la priorización por altura. Así, se propone un algoritmo en el cual se busca incorporar la importancia del tiempo por altura al algoritmo ya propuesto.

Para ello, se propone el intercambio de dos piezas de tal manera que la altura máxima de alguno de los dos grupos a los que pertenecen estas piezas varíe, viéndose reducida. La altura máxima de un grupo variará si al finalizar el intercambio, queda una pieza más baja que la anterior como la máxima altura. Para que esto se dé, se debe producir que la suma de las alturas máximas de los grupos se reduzca. Por tanto, el tiempo total de fabricación se verá también reducido ya que, solo se considerarán, según la fórmula empleada de (Kucukkoc, 2019), las máximas alturas de cada grupo.

En el Pseudocódigo 3- 9, se explica de manera genérica el procedimiento del algoritmo de búsqueda local. El primer paso es el cálculo de la superficie total ocupada por cada uno de los grupos. Mediante estos valores, se identificará si es posible hacer el intercambio de dos piezas en términos de superficie ocupada en la máquina, no siendo posible si ésta se ve superada. El segundo paso es el de la obtención de un vector de máximas alturas de cada grupo y otro de las segundas máximas alturas de cada grupo. De esta manera, se podrán hacer las comparaciones pertinentes con el fin de comprobar que la altura máxima de alguno de los grupos se ve reducida.

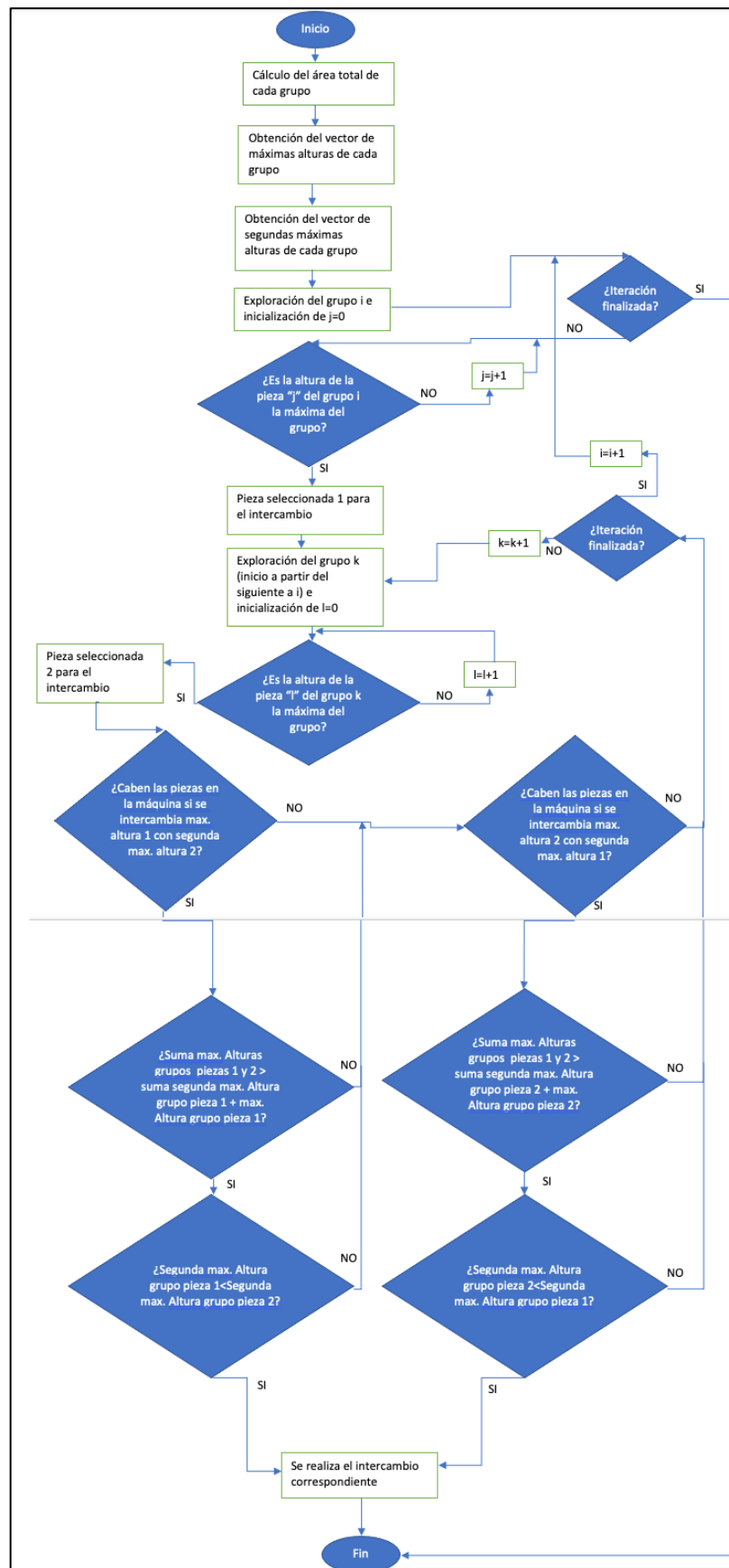
De esta manera, empieza la iteración en búsqueda de las dos piezas a intercambiar. Primeramente, se toma la pieza más alta del primer grupo, que se denominará “Pieza seleccionada 1”. En el Pseudocódigo 3- 9, se expresa el grupo de la “Pieza seleccionada 1” como i y el de la “Pieza seleccionada 2” como k . Por otro lado, las posiciones dentro de la fila se expresarán como j y l , respectivamente. A continuación, se compara con las piezas más altas del resto de grupos hasta encontrar una pieza (Pieza seleccionada 2) que cumpla las siguientes condiciones:

- Al realizarse el intercambio, la superficie de la máquina ocupada por las piezas del grupo no debe superar la capacidad de la máquina.
- La suma de las máximas alturas debe ser mayor que la suma de una de las máximas alturas de un grupo y una de las segundas máximas alturas del otro grupo.
- La segunda pieza más alta que va a ser cambiada debe ser menor que la segunda pieza más alta del otro grupo, en el cual se quedará, convirtiéndose en la más alta.

Si se dan estas condiciones, se procede al intercambio y finaliza el algoritmo. Las piezas que se intercambian son la pieza más alta de un grupo y la segunda pieza más alta del otro grupo, de manera que, en el grupo de la primera queda como más alta la segunda pieza más alta (que no ha sido objeto del intercambio) y, en el grupo de la segunda, queda la pieza intercambiada, la que era la más alta del otro grupo, como la más alta. En caso contrario, es decir, que no se reúnan las condiciones, se empieza a analizar las piezas del siguiente grupo. En caso de no encontrar ninguna pieza intercambiable con la “Pieza seleccionada 1”, se procede a elegir una nueva “Pieza seleccionada 1”, que se encontrará en el siguiente grupo. El algoritmo finalizará si no se ha encontrado ningún intercambio factible.

Como se puede observar, esta búsqueda local es la conocida como *First Improvement*, (Pérez González, Fernández-Viagas Escudero, & Framiñán Torres, 2020), en español: “Primera Mejora”. Este tipo de búsqueda local finaliza en el momento que se encuentra una mejora. Así, normalmente no será la que mejores resultados obtenga, pero sí la que los obtenga con mayor celeridad. Por tanto, si se desea obtener mejoras con premura, es la opción ideal. En este proyecto, se ha elegido este tipo de búsqueda local con el fin de demostrar que,

efectivamente, sí es posible mejorar el algoritmo, dejando abierta la posibilidad de profundizar en este aspecto para obtener resultados aún más favorables.



Pseudocódigo 3- 9. Búsqueda local

4 EXPERIMENTACIÓN

En el anterior capítulo, 3, para el desarrollo del algoritmo que busque mejorar los resultados del tiempo total de fabricación, se especifica los datos iniciales necesarios para el desarrollo de este, 3.1. Adicionalmente, se analiza detenidamente cómo se obtiene el tiempo de fabricación, 3.2. Finalmente, se detallan los algoritmos para la asignación de piezas, detallando el procedimiento de cada uno y su pseudocódigo. Así, se introduce en primer lugar el algoritmo por altura (3.3), según la regla de despacho *FIFO* (3.4), según la regla de despacho *First Fit* (3.5), por volumen (3.6), ponderado incluyendo los valores de la altura y el volumen (3.7), por cociente (3.8), por tiempo de fabricación (3.9) y por superficie (3.10). Al final, se añade un algoritmo de búsqueda local (3.11) que intente obtener mejoras en el algoritmo por superficie.

Asimismo, en el presente capítulo se expondrán las hipótesis por las cuales se rige la resolución de este proyecto, definiendo las características de las piezas y máquinas empleadas. Finalmente, se describirán las herramientas utilizadas para la aplicación y resolución de los algoritmos empleados.

4.1 Hipótesis para la aplicación del algoritmo

Con el objetivo de comprobar la validez de los algoritmos y la calidad de las soluciones, se procesa una batería de instancias en las que se dan una serie de piezas con sus características, (Li, Kucukkoc, & Zhang, ORE-Repository, 2015). Esta batería de datos está compuesta por 42 instancias con un número de piezas variable en cada una. Cada pieza tendrá como datos una identificación numérica, una altura (cm), una superficie (cm²) y un volumen (cm³). En total, se dispone de 1000 piezas.

Por otro lado, se tiene un listado de máquinas, cada una con unas características diferentes. De las máquinas se proporciona una serie de características, sin embargo, en este proyecto solo se tendrán en cuenta una serie de datos relacionados con las máquinas. Así, se tendrá en cuenta, en primer lugar, la superficie de trabajo que dispone la máquina. En el listado, únicamente se distinguen dos valores para las superficies de trabajo en las máquinas distintos: 1600 cm² y 625 cm². Por otro lado, estas máquinas también tendrán una capacidad en altura, teniendo las máquinas de 1600 cm² una altura máxima de 40 cm y las de 625 cm² una altura máxima de 32,5 cm. Finalmente, se proporcionan una serie de velocidades de la máquina. Para este proyecto, únicamente se tendrán en cuenta tres valores: tiempo de preparación (SET), tiempo por unidad de volumen (VT) y tiempo por unidad de altura (HT). El tiempo de preparación puede variar entre 1, 2 y 3 horas. Por otro lado, el tiempo por unidad de volumen (VT) puede variar entre dos valores: 0,030864 h/cm³ y 0,074074 h/cm³. Finalmente, el tiempo por unidad de altura (HT) puede variar entre dos valores: 0,7 h/cm y 1,4 h/cm. El resto de los datos de las máquinas incluidos en el listado no se tendrán en cuenta en este proyecto.

De este listado de máquinas, se escogerán seis para la aplicación de los algoritmos: dos de capacidad en superficie de 1600 cm², aunque con distintas velocidades:

- SET= 1h, VT=0,030864 h/cm³ y HT=0,7 h/cm.
- SET=2 h, VT=0,074074 h/cm³ y HT=1,4 h/cm.

Además de cuatro con una superficie de 625 cm²:

- SET= 1h, VT=0,030864 h/cm³ y HT=0,7 h/cm.
- SET= 1h, VT=0,074074 h/cm³ y HT=1,4 h/cm.
- SET= 2h, VT=0,074074 h/cm³ y HT=1,4 h/cm.

- SET= 3h, VT=0,074074 h/cm³ y HT=1,4 h/cm.

Para el caso de la implementación en las máquinas de una superficie de 625 centímetros cuadrados, se seleccionan 518 piezas de estas 1000, divididas en dos instancias de 250 y 318 respectivamente, que pueden ser introducidas en la máquina ya que respetan sus dimensiones máximas.

El listado de piezas y máquinas se obtiene del empleado por (Li, Kucukkoc, & Zhang, Production planning in additive manufacturing and 3D printing, 2017) para su trabajo, que es el siguiente: (Li, Kucukkoc, & Zhang, ORE-Repository, 2015). Por último, las piezas objeto de estudio para introducir en una máquina siempre tendrán una superficie y una altura menor a la máxima de la máquina, con el objetivo de que todas las piezas puedan ser asignadas.

Al finalizar cada algoritmo, se procede al cálculo del tiempo de proceso de cada grupo.

Para la ejecución del algoritmo, para mayor comodidad, se han usado distintas unidades. Así, la altura se ha tomado en mm⁻¹, el área en mm², el HT en h/mm⁻¹. El resto de los valores han mantenido sus unidades originales.

4.2 Herramientas utilizadas

Para la implementación del algoritmo, se ha elegido el lenguaje de programación C. Este lenguaje de programación es lo suficientemente potente para la realización de los algoritmos que en este proyecto se aplican. El programa en el cual se ha implementado y obtenido los resultados ha sido *Codeblocks* (v17.12) (Code::Blocks, 2020), debido a la flexibilidad de este y que es un software que permite trabajar con el lenguaje de programación C. Se ha implementado además la librería *Schedule* (Industrial Optimization Research Group, 2021), en la cual hay incorporadas funciones con vectores y matrices, como búsqueda de valores en ellos (*search_vector*) u ordenación de vectores (*sort_vector*), que resultan beneficiosas y cómodas para la implementación del algoritmo.

Posteriormente, los resultados se han expuesto en el programa *Bloc de notas* para luego ser copiados en el programa *Microsoft Excel* (v16.50).

5 RESULTADOS OBTENIDOS

En el anterior capítulo, 4, se han expuesto las hipótesis sobre las cuales se van a aplicar los algoritmos diseñados para las instancias descritas, es decir, qué máquinas van a ser usadas, cuáles son las características de estas máquinas y qué piezas van a ser objeto de la simulación del proceso. Finalmente, en el apartado 4.2, se exponen las herramientas utilizadas para la aplicación de los algoritmos y la obtención de los resultados.

De esta manera, en el presente capítulo se expondrán primeramente los factores claves para la determinación del tiempo de fabricación, apoyándose en la descripción de la ecuación del apartado 3.2. Seguidamente, en el apartado 5.2, se expondrán los resultados para el algoritmo que ofrece los tiempos de fabricación totales más bajos, exponiendo las razones y comparándolo con el resto de los algoritmos. A continuación, se expondrán los resultados obtenidos del algoritmo de búsqueda local del apartado 3.11 y la comparación de los resultados de esta y del algoritmo por superficie. Finalmente, se expondrán las vías de mejora para el futuro que se espera que produzcan mejores resultados que los obtenidos en el presente proyecto.

5.1 Aspectos clave para la mejora de los resultados

Una vez desarrollados todos los algoritmos, se ha comprobado los resultados mediante las instancias mencionadas en el apartado 4.1. Así, se comprueba que el cómputo global de los resultados obtenidos son valores de tiempos de fabricación elevados. De esta manera, una vez se introdujo la fórmula para la obtención del tiempo de fabricación en el apartado 3.2, se debe identificar cuáles son los términos más importantes de esta. Éstos serán los que otorguen valores más significativos en el tiempo de fabricación. Así, se comprueba que el volumen será el que marcará mayormente el tiempo de fabricación debido al orden de magnitud de este y del resto de términos de la fórmula. Sin embargo, con vistas a la finalidad de cambiar la suma de los tiempos totales de fabricación de los grupos de piezas, se comprueba que el volumen no afectará. La razón por la cual el volumen no va a modificar el tiempo total de fabricación es que siempre se deberá producir en su totalidad, imposibilitando el ahorro de tiempo mediante este valor. Por el contrario, se observa que el tiempo por unidad de altura y el tiempo de preparación de la máquina sí pueden hacer que se modifique el tiempo total de fabricación. Por un lado, el tiempo por unidad de altura de un grupo de piezas lo marcará la pieza más alta del mismo, con lo que conlleva que, si varias piezas altas se introdujesen en el mismo grupo, solo se tendría en cuenta para la suma del tiempo total de fabricación a la más elevada de ellas. Por tanto, esta sería una vía de mejora. Por otro lado, el tiempo de preparación de la máquina solo se computará si se produce un nuevo grupo de piezas, es decir, a menos grupos de piezas, menos veces se deberá contar con este tiempo, por lo que sería otra vía de mejora.

De esta forma, una vez se comprueba cuáles son los términos de la fórmula para la obtención del tiempo de fabricación que son relevantes para reducirlo, se deben comparar y comprobar cual de ellos es más determinante. Así, se determina que, por el orden de magnitud de ambos, el tiempo por unidad de altura queda como el más importante para que la reducción de tiempo sea más significativa. Este hecho se puede comprobar en los resultados obtenidos, observándose que el que menores valores de tiempo total de fabricación obtiene es el algoritmo del apartado 3.3.

5.2 Resultados obtenidos

Una vez se ha obtenido la ordenación de las piezas en un algoritmo de los distintos grupos de fabricación, se procede al cálculo de los tiempos de fabricación para el algoritmo. Los resultados obtenidos, expresados en

horas, por el algoritmo por altura (3.3) se muestran en la Tabla 5- 1¹. En la Tabla 5- 1, se observa como los resultados son muy variables, ya que dependen en gran medida de las características de las piezas de la instancia. Por ejemplo, para 10 piezas, el valor obtenido en la instancia 1 y en la instancia 2 son muy diferentes, aumentando el segundo en un 50% el valor del primero. Sin embargo, para 14 piezas, se obtiene mejores resultados que para la instancia 2 con 10 piezas. Aunque cuando se trata de diferencias relevantes en el número de piezas, sí se observan diferencias en los resultados obtenidos, aumentando considerablemente el tiempo total de fabricación para instancias con más piezas.

¹ Los resultados obtenidos por el resto de los algoritmos constructivos se expresarán en el Anexo A.

Algoritmo por altura	PIEZAS	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1109,03	2639,67				
Instancia 2	10	1589,28	3790,33				
Instancia 3	14	1230,3	2926,26				
Instancia 4	16	1741,05	4136,09				
Instancia 5	18	1674,2	3987,34				
Instancia 6	20	3152,84	7510,53				
Instancia 7	15	1863,13	4433,54				
Instancia 8	18	2314,48	5509,40				
Instancia 9	21	1886,3	4485,35				
Instancia 10	24	2697,1	6436,02				
Instancia 11	27	3076,13	7326,94				
Instancia 12	30	3845,68	9163,94				
Instancia 13	20	2632,78	6274,12				
Instancia 14	24	2983,14	7111,08				
Instancia 15	28	3182,64	7584,34				
Instancia 16	32	3743,09	8925,39				
Instancia 17	36	4646,23	11072,79				
Instancia 18	40	4535,15	10809,25				
Instancia 19	25	5259,22	12546,19				
Instancia 20	30	3593,52	8566,57				
Instancia 21	35	4792,34	11433,00				
Instancia 22	40	5811,06	13861,72				
Instancia 23	60	7410,36	17668,50				
Instancia 24	80	8506,79	20275,43				
Instancia 25	100	10381,03	24756,45				
Instancia 26	120	11883,5	28324,17				
Instancia 27	140	16025,22	38196,49				
Instancia 28	160	18945,77	45185,88				
Instancia 29	180	23765,39	56690,13				
Instancia 30	200	24628,14	58745,96				
Instancia 31	30	3535,48	8425,74				
Instancia 32	60	6205,96	14799,87				
Instancia 33	90	8594,48	20491,23				
Instancia 34	120	13585,15	32391,60				
Instancia 35	160	18276,68	43565,96				
Instancia 36	200	24019,42	57292,01				
Instancia 37	250	33666,16	80310,17				
Instancia 38	300	31382,04	74839,61				
Instancia 39	360	42261,39	100788,49				
Instancia 40	420	51829,1	123642,17				
Instancia 41	590	74249,67	177115,87				
Instancia 42	660	81016,44	193252,17				
Instancia 1	250			15240,55	35897,06	36009,06	36121,06
Instancia 2	318			18644,11	43931,9	44071,9	44211,9

Tabla 5- 1. Resultados del algoritmo por altura (horas)

Para expresar la diferencia de los resultados de los distintos algoritmos, se usa el término RPD (*Relative Percentage Deviation*), en español: desviación porcentual relativa. Mediante este valor, se compara la solución del algoritmo estudiado y se expresa la diferencia con la mejor solución, en este caso la de menor valor. Cuanto más próximo se encuentre este valor del cero, más próxima a la mejor solución estará la solución estudiada. En caso de ser nulo, expresará que se trata de la mejor solución. La fórmula para la obtención del valor del RPD realiza la diferencia entre la solución del algoritmo estudiado y la mejor solución, que finalmente compara con la mejor solución mediante el cociente de estos dos valores. Todos los valores de RPD se expresan en tanto por uno, tomando como “0” el valor mínimo y valor máximo “1”.

La obtención del valor RPD para un determinado algoritmo i se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$RPD_i = \frac{\text{Solución algoritmo } i - \text{Mejor solución}}{\text{Mejor solución}}$$

Ecuación 2. Obtención de RPD

En la Tabla 5- 2² se expresan la comparativa de los algoritmos en términos de RPD para la máquina de 1600 cm², SET de 1 hora, VT de 0,030864 h/cm³ y HT de 0,7 h/cm. Se observa como en la mayoría de las instancias, el algoritmo que obtiene mejores resultados es el ordenado según la altura de las piezas (3.3), que se marca en amarillo. Es observable que las diferencias no son muy significativas, obteniéndose valores máximos de un tres por ciento. El motivo de la poca diferencia de las soluciones se debe el orden de magnitud de los valores del volumen con respecto a la altura de las piezas y, por supuesto, a la velocidad de la máquina con respecto al volumen y la altura. Como se ha dicho anteriormente (5.1), el volumen no marcará ninguna diferencia en el tiempo total de fabricación, al tener que computarse en su totalidad. Sin embargo, al ser el volumen el valor más significativo, es el que marcará en mayor medida el tiempo total de fabricación, dejando poco margen de mejora variando los otros términos de la Ecuación 1: la altura máxima del grupo y la superficie total ocupada por el grupo (en relación con el tiempo de preparación).

El algoritmo que peores resultados ofrece es el algoritmo FIFO (3.4). La causa de estos malos resultados se debe a la falta de organización total en este algoritmo, respondiendo únicamente a la aleatoriedad de la ordenación de las piezas. Por supuesto, el otro motivo por el cual este algoritmo ofrece los peores resultados es que en el momento en que encuentra una pieza que no puede ser asignada al grupo, ya que no cabe, éste crea un nuevo grupo, pudiendo dejar grandes espacios sin aprovechar en los grupos. Este algoritmo arroja un aumento de entre un dos y un tres por ciento con respecto al de mejor solución.

El algoritmo *First Fit* (3.5) tampoco arroja unos resultados mucho mejores que el algoritmo FIFO. Éste también obedece a criterios de aleatoriedad en la asignación de las piezas, puesto que no elige concienzudamente las piezas. Sin embargo, sí que mejora al algoritmo FIFO debido a que sí busca piezas hasta poder completar la superficie total ocupada por el grupo. Finalmente, este algoritmo proporciona unos resultados entre uno y dos puntos porcentuales mayor que el algoritmo por altura.

El algoritmo por volumen (3.6) proporciona unos resultados mejores que los dos anteriores. El motivo por el cual ofrece mejores resultados que los dos anteriores es que normalmente, las piezas con volúmenes mayores serán piezas con grandes dimensiones, es decir, con gran superficie y altura. Esta última es interesante, ya que, al incluir piezas de volúmenes elevados, podrá coincidir que se incluyan en el mismo grupo piezas de alturas altas, que como se ha expresado a lo largo del proyecto, favorecerá la reducción del tiempo total de fabricación. Por el contrario, como se ha dicho, existe la posibilidad de que una pieza sea voluminosa exclusivamente por su superficie, y no por su altura, haciendo que este algoritmo no genere tan buenos resultados como el ordenado por altura. Este algoritmo arroja unos resultados entre medio y dos puntos porcentuales mayor que el algoritmo por altura.

El siguiente algoritmo, el ordenado según una ponderación del volumen y la altura (3.7), arroja unos resultados prácticamente iguales que el ordenado según el volumen. Esto se debe a que, a pesar de que el volumen esté únicamente considerado como el diez por ciento, el orden de magnitud del volumen provoca que sea el que determine el valor final de la ponderación. Así, las piezas más voluminosas serán las de mayor valor de ponderación, siendo de esta manera parecido al ordenado por volumen.

A continuación, se presenta el algoritmo donde la primera pieza del grupo se elige según la relación área-altura (cociente) y el resto, de mayor a menor altura (3.8). Como se puede observar en la Tabla 5- 2, los resultados son bastante similares al algoritmo por altura. El motivo de esta similitud es que la mayoría de las piezas de este algoritmo se eligen según la altura, ya que la relación área-altura solo interviene en la primera pieza del grupo.

Seguidamente, se compara con el algoritmo ordenado según el tiempo de fabricación individual de cada pieza (3.9). Los resultados de este algoritmo empeoran entre uno y dos puntos porcentuales al algoritmo por altura. Si se observan los resultados, se puede ver que son muy similares al algoritmo ordenado según el volumen. Esto refuerza lo mencionado anteriormente en el apartado 5.1, es decir, que el tiempo de fabricación depende

² En amarillo se marca el algoritmo que mejores resultados proporciona en general: el algoritmo por altura.

en mayor medida del volumen de la pieza. Por tanto, realmente quedará una asignación con unos resultados parecidos al algoritmo por volumen.

Finalmente, se puede observar que el algoritmo ordenado por superficie de las piezas (3.10) proporciona resultados peores que el ordenado por altura. Esto se debe a que sigue únicamente el orden por superficie, sin prestar atención a la altura de las piezas. Así, es posible que en este algoritmo haya menos grupos de piezas, pero debido a la poca relevancia del tiempo de preparación en el proceso por su bajo valor, no mejora en gran medida el resultado.

CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm									
	PIEZAS	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD
		Algoritmo	Algoritmo	Algoritmo	Algoritmo	Algoritmo	Algoritmo	Algoritmo	Algoritmo
		por altura	FIFO	First Fit	por volumen	ponderado	por cociente	por tiempo de fabricación	por superficie
Instancia 1	10	0,005	0,030	0,027	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
Instancia 2	10	0,000	0,011	0,011	0,003	0,003	0,000	0,003	0,002
Instancia 3	14	0,000	0,018	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019
Instancia 4	16	0,000	0,021	0,017	0,010	0,005	0,000	0,005	0,009
Instancia 5	18	0,000	0,016	0,017	0,006	0,006	0,001	0,006	0,015
Instancia 6	20	0,001	0,015	0,010	0,007	0,000	0,002	0,000	0,002
Instancia 7	15	0,000	0,010	0,003	0,006	0,006	0,000	0,006	0,014
Instancia 8	18	0,000	0,029	0,015	0,001	0,002	0,001	0,001	0,011
Instancia 9	21	0,000	0,029	0,013	0,005	0,005	0,004	0,005	0,012
Instancia 10	24	0,000	0,024	0,011	0,011	0,006	0,000	0,005	0,008
Instancia 11	27	0,000	0,028	0,017	0,011	0,001	0,000	0,001	0,015
Instancia 12	30	0,000	0,019	0,009	0,006	0,006	0,004	0,006	0,007
Instancia 13	20	0,000	0,026	0,015	0,005	0,005	0,000	0,005	0,012
Instancia 14	24	0,000	0,033	0,022	0,016	0,016	0,000	0,007	0,015
Instancia 15	28	0,000	0,025	0,012	0,011	0,008	0,000	0,007	0,014
Instancia 16	32	0,000	0,025	0,016	0,007	0,007	0,000	0,003	0,013
Instancia 17	36	0,000	0,023	0,010	0,009	0,009	0,001	0,009	0,019
Instancia 18	40	0,000	0,017	0,014	0,014	0,015	0,002	0,012	0,013
Instancia 19	25	0,000	0,011	0,012	0,005	0,005	0,004	0,005	0,009
Instancia 20	30	0,000	0,014	0,018	0,004	0,004	0,001	0,004	0,011
Instancia 21	35	0,000	0,019	0,015	0,005	0,004	0,004	0,002	0,007
Instancia 22	40	0,000	0,019	0,013	0,009	0,009	0,000	0,009	0,013
Instancia 23	60	0,000	0,021	0,015	0,012	0,010	0,000	0,011	0,013
Instancia 24	80	0,000	0,023	0,016	0,011	0,010	0,003	0,011	0,018
Instancia 25	100	0,000	0,025	0,020	0,014	0,015	0,002	0,013	0,018
Instancia 26	120	0,000	0,029	0,022	0,020	0,017	0,002	0,016	0,015
Instancia 27	140	0,000	0,021	0,016	0,011	0,011	0,002	0,010	0,012
Instancia 28	160	0,000	0,027	0,017	0,015	0,014	0,001	0,013	0,013
Instancia 29	180	0,000	0,021	0,015	0,014	0,014	0,001	0,011	0,014
Instancia 30	200	0,000	0,025	0,017	0,013	0,012	0,001	0,013	0,014
Instancia 31	30	0,000	0,011	0,014	0,006	0,005	0,003	0,006	0,014
Instancia 32	60	0,000	0,028	0,021	0,015	0,014	0,002	0,014	0,016
Instancia 33	90	0,000	0,029	0,021	0,021	0,017	0,001	0,020	0,015
Instancia 34	120	0,000	0,023	0,019	0,017	0,016	0,001	0,015	0,014
Instancia 35	160	0,000	0,022	0,017	0,014	0,013	0,002	0,012	0,013
Instancia 36	200	0,000	0,026	0,017	0,015	0,014	0,002	0,013	0,015
Instancia 37	250	0,000	0,021	0,014	0,013	0,012	0,001	0,010	0,012
Instancia 38	300	0,000	0,028	0,021	0,018	0,016	0,001	0,017	0,015
Instancia 39	360	0,000	0,025	0,018	0,015	0,015	0,002	0,014	0,014
Instancia 40	420	0,000	0,024	0,017	0,015	0,014	0,001	0,013	0,015
Instancia 41	590	0,000	0,023	0,017	0,015	0,015	0,002	0,014	0,013
Instancia 42	660	0,000	0,024	0,018	0,015	0,014	0,002	0,015	0,014

Tabla 5- 2. Comparación RPD entre algoritmos para CAP: 1600 cm², SET: 1h, VT: 0,030864 h/cm³ y HT: 0,7 h/cm

Como se puede observar, las mejoras en términos porcentuales no son muy significativas. La razón es que la mayor parte del tiempo de fabricación está marcado por el volumen de las piezas, factor que como se ha dicho anteriormente 3.2, no puede reducir el tiempo total de fabricación, al computarse en su totalidad. Sin embargo, en términos globales, sí pueden llegar a ser significativos los resultados obtenidos, apreciándose ciertas diferencias en horas. Es por ello por lo que, si en un futuro se consiguiera reducir el tiempo empleado por unidad de volumen, este algoritmo podría arrojar resultados mucho más significativos que los actuales.

Por otro lado, en la Tabla 5- 3 y Tabla 5- 4, se expresan la comparación de los algoritmos para la máquina de 625 cm², SET de 1 hora, VT de 0,030864 h/cm³ y HT de 0,7 h/cm y la de igual capacidad y tiempo de preparación, pero con valores más altos de VT (0,074074 h/cm³) y HT (1,4 h/cm). En ellas, se puede observar que, a mayor lentitud en las máquinas, es decir, la de la Tabla 5- 4, menor diferencia existe entre los resultados de los algoritmos.

CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm	RPD								
	RPD			RPD		RPD		RPD	
	Algoritmo			Algoritmo		Algoritmo		Algoritmo	
	PIEZAS	por altura	FIFO	First Fit	por volumen	ponderado	por cociente	por tiempo de fabricación	por superficie
Instancia 1	250	0,000	0,046	0,024	0,019	0,017	0,027	0,020	0,026
Instancia 2	318	0,000	0,047	0,029	0,020	0,019	0,031	0,023	0,023

Tabla 5- 3. Comparación RPD entre algoritmos para CAP: 625 cm², SET: 1h, VT: 0,030864 h/cm³ y HT: 0,7 h/cm

CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	RPD								
	RPD			RPD		RPD		RPD	
	Algoritmo			Algoritmo		Algoritmo		Algoritmo	
	PIEZAS	por altura	FIFO	First Fit	por volumen	ponderado	por cociente	por tiempo de fabricación	por superficie
Instancia 1	250	0,000	0,039	0,021	0,016	0,015	0,023	0,016	0,022
Instancia 2	318	0,000	0,039	0,024	0,016	0,016	0,025	0,017	0,019

Tabla 5- 4. Comparación RPD entre algoritmos para CAP: 625 cm², SET: 1h, VT: 0,074074 h/cm³ y HT: 1,4 h/cm

Finalmente, se comprueba que, efectivamente, el algoritmo que mejores resultados proporciona es el algoritmo por altura (3.3). Sin embargo, como se ha explicado en el punto 3.11, obtener mejoras de sus resultados es complejo y no resultarían muy diferentes. Así, se decide comparar los resultados del algoritmo por superficie con los resultados obtenidos del algoritmo de búsqueda local del apartado 3.11. Los resultados obtenidos por el algoritmo por superficie se muestran en la Tabla 5- 5 y los relativos a la búsqueda local se reflejan en la Tabla 5- 6, ambos se expresan en horas. Se observa que los resultados de la búsqueda local no varían en demasía con los obtenidos por el algoritmo por superficie. Para una mayor facilidad de interpretación de los resultados, se muestra una comparación que se puede ver reflejada en la Tabla 5- 7, en la cual se expresa la diferencia entre el algoritmo por superficie y la búsqueda local para todas las máquinas consideradas en este proyecto (4.1). Se puede observar en la Tabla 5- 7, expresada en términos de RPD, que los resultados de la búsqueda local mejoran al algoritmo. Sin embargo, al ser la búsqueda local de *First Improvement*, las mejoras obtenidas no son muy significativas, ya que la búsqueda local se detiene en el momento que se encuentra la primera mejora, sin profundizar en la búsqueda de la mejor solución. Considerando la opción de búsqueda local elegida, estos resultados muestran que, si se lleva a cabo un proceso de búsqueda local más exhaustivo, es probable obtener resultados mejores que los que se muestran.

Algoritmo por superficie	PIEZAS	CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1103,50	2628,64				
Instancia 2	10	1591,68	3795,12				
Instancia 3	14	1254,26	2974,16				
Instancia 4	16	1757,34	4168,69				
Instancia 5	18	1700,06	4039,07				
Instancia 6	20	3155,49	7515,81				
Instancia 7	15	1888,85	4484,95				
Instancia 8	18	2338,85	5558,09				
Instancia 9	21	1908,48	4529,76				
Instancia 10	24	2718,53	6478,87				
Instancia 11	27	3123,48	7421,65				
Instancia 12	30	3873,13	9218,82				
Instancia 13	20	2664,52	6337,61				
Instancia 14	24	3027,80	7200,40				
Instancia 15	28	3227,89	7674,81				
Instancia 16	32	3793,38	9025,96				
Instancia 17	36	4733,74	11247,83				
Instancia 18	40	4591,85	10922,68				
Instancia 19	25	5305,47	12638,67				
Instancia 20	30	3633,32	8646,14				
Instancia 21	35	4826,95	11502,22				
Instancia 22	40	5884,30	14008,13				
Instancia 23	60	7510,27	17868,33				
Instancia 24	80	8661,76	20585,43				
Instancia 25	100	10570,40	25135,18				
Instancia 26	120	12060,30	28677,86				
Instancia 27	140	16213,31	38572,65				
Instancia 28	160	19197,43	45689,22				
Instancia 29	180	24098,05	57355,41				
Instancia 30	200	24974,74	59439,13				
Instancia 31	30	3584,92	8524,62				
Instancia 32	60	6307,52	15002,99				
Instancia 33	90	8720,22	20742,70				
Instancia 34	120	13777,81	32776,92				
Instancia 35	160	18520,41	44053,41				
Instancia 36	200	24372,22	57997,57				
Instancia 37	250	34076,02	81129,9				
Instancia 38	300	31863,52	75802,66				
Instancia 39	360	42844,59	101954,93				
Instancia 40	420	52606,88	125197,62				
Instancia 41	590	75241,93	179100,39				
Instancia 42	660	82184,98	195589,12				
Instancia 1	250			15632,91	36685,88	36793,88	36901,88
Instancia 2	318			19076,13	44767,69	44903,69	45039,69

Tabla 5- 5. Resultados algoritmo por superficie (horas)

BÚSQUEDA LOCAL	PIEZAS	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1103,5	2628,64				
Instancia 2	10	1591,68	3795,12				
Instancia 3	14	1249,85	2965,34				
Instancia 4	16	1755,2	4164,42				
Instancia 5	18	1698,84	4036,62				
Instancia 6	20	3152,9	7510,65				
Instancia 7	15	1884,35	4475,96				
Instancia 8	18	2337,59	5555,57				
Instancia 9	21	1908,02	4528,81				
Instancia 10	24	2718,53	6478,87				
Instancia 11	27	3123,48	7421,65				
Instancia 12	30	3872,64	9217,85				
Instancia 13	20	2663,12	6334,81				
Instancia 14	24	3021,36	7187,5				
Instancia 15	28	3225,51	7670,08				
Instancia 16	32	3792,26	9023,71				
Instancia 17	36	4730,19	11240,71				
Instancia 18	40	4590,46	10919,91				
Instancia 19	25	5301,88	12631,49				
Instancia 20	30	3632,38	8644,26				
Instancia 21	35	4826,44	11501,19				
Instancia 22	40	5880,33	14000,19				
Instancia 23	60	7509,98	17867,74				
Instancia 24	80	8661,34	20584,6				
Instancia 25	100	10569,06	25132,5				
Instancia 26	120	12060,07	28677,38				
Instancia 27	140	16200,62	38547,26				
Instancia 28	160	19179,69	45653,76				
Instancia 29	180	24093,95	57347,21				
Instancia 30	200	24973,75	59437,15				
Instancia 31	30	3584,9	8524,56				
Instancia 32	60	6306,14	15000,22				
Instancia 33	90	8719,99	20742,22				
Instancia 34	120	13766,59	32754,46				
Instancia 35	160	18518,04	44048,66				
Instancia 36	200	24369,43	57991,99				
Instancia 37	250	34073,24	81124,34				
Instancia 38	300	31861,77	75799,15				
Instancia 39	360	42843,13	101952,02				
Instancia 40	420	52606,6	125197,08				
Instancia 41	590	75235,41	179087,35				
Instancia 42	660	82183,8	195586,75				
Instancia 1	250			15625,81	36671,73	36779,73	36887,73
Instancia 2	318			19068,78	44752,98	44888,98	45024,98

Tabla 5- 6. Resultados obtenidos para el algoritmo de búsqueda local (horas)

COMPARACIÓN ALGORITMO POR ÁREA CON BÚSQUEDA LOCAL (RPD)		CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm		CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm		CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm		CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm		CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm		CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	
		ALGORITMO POR SUPERFICIE	BÚSQUEDA LOCAL	ALGORITMO POR SUPERFICIE	BÚSQUEDA LOCAL	ALGORITMO POR SUPERFICIE	BÚSQUEDA LOCAL	ALGORITMO POR SUPERFICIE	BÚSQUEDA LOCAL	ALGORITMO POR SUPERFICIE	BÚSQUEDA LOCAL	ALGORITMO POR SUPERFICIE	BÚSQUEDA LOCAL
Instancia 1	10	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 2	10	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 3	14	0,004	0,000	0,003	0,000								
Instancia 4	16	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 5	18	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 6	20	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 7	15	0,002	0,000	0,002	0,000								
Instancia 8	18	0,001	0,000	0,000	0,000								
Instancia 9	21	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 10	24	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 11	27	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 12	30	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 13	20	0,001	0,000	0,000	0,000								
Instancia 14	24	0,002	0,000	0,002	0,000								
Instancia 15	28	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 16	32	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 17	36	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 18	40	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 19	25	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 20	30	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 21	35	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 22	40	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 23	60	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 24	80	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 25	100	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 26	120	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 27	140	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 28	160	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 29	180	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 30	200	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 31	30	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 32	60	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 33	90	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 34	120	0,001	0,000	0,001	0,000								
Instancia 35	160	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 36	200	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 37	250	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 38	300	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 39	360	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 40	420	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 41	590	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 42	660	0,000	0,000	0,000	0,000								
Instancia 1	250					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Instancia 2	318					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 5- 7. Comparativa RPD de los resultados del algoritmo por superficie y el de búsqueda local

6 CONCLUSIONES

En el anterior capítulo, 5, se detallan los resultados obtenidos tanto por el algoritmo por altura, como por los algoritmos de comparación. Adicionalmente, se establece un método de búsqueda de nuevas soluciones con el objetivo de mejorar uno de los algoritmos, el algoritmo por superficie, detallándose un proceso de búsqueda local.

A lo largo de este proyecto se ha analizado lo que hasta ahora se ha desarrollado en la fabricación aditiva, analizando los aspectos positivos y los mejorables. Posteriormente, se ha elegido analizar en detalle el inconveniente del elevado tiempo de fabricación y se han estudiado las vías para obtener mejores resultados, diseñando varios algoritmos de agrupación de piezas para realizar conjuntamente en la máquina. Comparándolos, se ha comprobado que, para el objetivo final de la mejora del tiempo total de fabricación, el algoritmo ordenado según la altura de las piezas (3.3) es el que mejor resultados proporciona. Así, por otro lado, resulta interesante analizar vías de mejora de otro algoritmo, el algoritmo por superficie, realizando una búsqueda local con el fin de, obtener mejores resultados por otra vía, incorporando la consideración de, además del número de grupos, la altura de las piezas. De esta manera, se comprueba que la búsqueda local consigue obtener mejoras del algoritmo.

6.1 Vías de mejora de cara al futuro

Como se ha expresado a lo largo del documento, el objetivo de este proyecto ha sido el de la reducción del tiempo total de fabricación para un conjunto de piezas en máquinas de fabricación aditiva. Se ha centrado la idea de este proyecto en buscar alternativas para la producción que permitan obtener tiempos más reducidos con las características de las máquinas actuales. De esta manera, la alternativa propuesta ha sido la programación de la producción de piezas en grupos de fabricación en los cuales las piezas se producen de manera simultánea en el mismo grupo.

Así, como se muestra en los resultados obtenidos por todos los algoritmos, las mejoras no son excesivamente notables, debido a, como se ha dicho en el apartado 5.1, la importancia del volumen en el tiempo de fabricación y su imposibilidad de reducir este valor.

Por tanto, de cara al futuro, se presenta como aspecto clave para poder conseguir mejoras sustenciosas el aumento de la velocidad por unidad de volumen (VT), ya que, de esta manera, se reducirán considerablemente los tiempos totales de fabricación.

Otro aspecto en el cual se puede conseguir una mejora, aunque no tan determinante como la mencionada previamente, es en la superficie de trabajo de las máquinas. Un aumento de la capacidad de las máquinas permitiría aumentar el número de piezas por grupo que se pueden realizar simultáneamente, reduciendo de esta manera los tiempos de fabricación.

REFERENCIAS

- Aloui, A., & Hadj-Hamou, K. (2021). A heuristic approach for a scheduling problem in additive manufacturing under technological constraints. *Computers & Industrial Engineering*(154).
- Bártolo, P. J. (2011). *Stereolithography. Materials, Processes and Applications*. Leiria, Portugal: Springer.
- Code::Blocks. (2020). *Code::Blocks*. (Code::Blocks) Retrieved Junio 2021, from <https://www.codeblocks.org>
- Formlabs. (n.d.). *Formlabs*. Retrieved Julio 2021, from <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>
- Industrial Optimization Research Group. (2021). *Optimización Industrial*. (Universidad de Sevilla) Retrieved Junio 2021, from <http://grupo.us.es/oindustrial/investigacion/software-y-librerias/libreria-schedule/>
- Kramer, S., Jordan, J., Jin, H., Carroll, J., & Beese, A. (2019). *Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing, Volume 8 Proceedings of the 2018 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics* (Vol. 8). EEUU: Springer.
- Kucukkoc, I. (2019). MILP models to minimise makespan in additive manufacturing machine scheduling problems. *Computers and Operations Research*(105), 58-67.
- Li, Q., Kucukkoc, I., & Zhang, D. (2015). *ORE-Repository*. (University of Exeter) Retrieved 2021, from <http://hdl.handle.net/10871/17360>
- Li, Q., Kucukkoc, I., & Zhang, D. (2017). Production planning in additive manufacturing and 3D printing. *Computers and Operations Research*(83), 157-172.
- Oh, Y., Witherell, P., Lu, Y., & Sprock, T. (2020). Nesting and scheduling problems for additive manufacturing: A taxonomy and review. *Additive Manufacturing*(36).
- Pérez González, P., Fernández-Viagas Escudero, V., & Framiñán Torres, J. M. (2020). *Programación de la Producción*. Sevilla: Sección de Publicadores, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- Schmid, M. (2018). *Laser sintering with plastics: technology, processes, and materials*. Munich: Hanser Publishers.
- V., C. (2020, Diciembre 7). *3dnatives*. Retrieved 2021, from <https://www.3dnatives.com/en/environmental-impact-metal-additive-manufacturing-071220204/>
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., & Wiener, S. (2017). *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Cham, Switzerland: Springer.

7 ANEXO A. RESULTADOS OBTENIDOS

7.1 Resultados para el algoritmo FIFO

Algoritmo FIFO	PIEZAS	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1136,16	2693,97				
Instancia 2	10	1606,85	3825,47				
Instancia 3	14	1252,18	2970,01				
Instancia 4	16	1777,35	4208,70				
Instancia 5	18	1702,28	4043,47				
Instancia 6	20	3196,65	7598,10				
Instancia 7	15	1881,25	4469,77				
Instancia 8	18	2383,56	5647,54				
Instancia 9	21	1949,15	4611,08				
Instancia 10	24	2761,58	6564,96				
Instancia 11	27	3162,28	7499,23				
Instancia 12	30	3934,35	9341,32				
Instancia 13	20	2702,15	6412,91				
Instancia 14	24	3082,45	7309,69				
Instancia 15	28	3263,02	7745,07				
Instancia 16	32	3836,24	9111,68				
Instancia 17	36	4759,21	11298,71				
Instancia 18	40	4619,80	10978,61				
Instancia 19	25	5341,20	12710,13				
Instancia 20	30	3649,07	8677,65				
Instancia 21	35	4889,14	11626,60				
Instancia 22	40	5925,66	14090,92				
Instancia 23	60	7571,18	17990,14				
Instancia 24	80	8730,85	20723,55				
Instancia 25	100	10663,91	25322,31				
Instancia 26	120	12243,36	29044,02				
Instancia 27	140	16404,28	38954,56				
Instancia 28	160	19482,21	46258,75				
Instancia 29	180	24284,70	57728,78				
Instancia 30	200	25275,38	60040,40				
Instancia 31	30	3587,37	8529,52				
Instancia 32	60	6394,11	15176,23				
Instancia 33	90	8846,90	20996,14				
Instancia 34	120	13911,65	33044,56				
Instancia 35	160	18710,66	44433,87				
Instancia 36	200	24687,36	58627,79				
Instancia 37	250	34434,93	81847,76				
Instancia 38	300	32297,52	76670,72				
Instancia 39	360	43398,02	103061,66				
Instancia 40	420	53128,00	126239,99				
Instancia 41	590	76099,72	180815,90				
Instancia 42	660	83110,32	197439,73				
Instancia 1	250			15947,68	37281,26	37423,26	37565,26
Instancia 2	318			19528,56	45629,87	45808,87	45987,87

Tabla 7- 1. Resultados para el algoritmo FIFO (horas).

7.2 Resultados para el algoritmo First Fit

Algoritmo First Fit	PIEZAS	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1133,73	2689,06				
Instancia 2	10	1606,85	3825,46				
Instancia 3	14	1247,06	2959,77				
Instancia 4	16	1770,21	4194,40				
Instancia 5	18	1702,27	4043,48				
Instancia 6	20	3181,60	7568,01				
Instancia 7	15	1867,94	4443,12				
Instancia 8	18	2349,98	5580,41				
Instancia 9	21	1910,91	4534,58				
Instancia 10	24	2725,87	6493,55				
Instancia 11	27	3129,06	7432,81				
Instancia 12	30	3880,17	9232,93				
Instancia 13	20	2671,98	6352,56				
Instancia 14	24	3050,16	7245,13				
Instancia 15	28	3220,72	7660,49				
Instancia 16	32	3801,32	9041,84				
Instancia 17	36	4693,95	11168,22				
Instancia 18	40	4599,55	10938,05				
Instancia 19	25	5324,69	12677,12				
Instancia 20	30	3657,79	8695,12				
Instancia 21	35	4863,98	11576,25				
Instancia 22	40	5885,00	14009,58				
Instancia 23	60	7523,34	17894,46				
Instancia 24	80	8642,51	20546,89				
Instancia 25	100	10588,70	25171,82				
Instancia 26	120	12141,07	28839,39				
Instancia 27	140	16286,34	38718,69				
Instancia 28	160	19265,51	45825,39				
Instancia 29	180	24131,54	57422,39				
Instancia 30	200	25037,72	59565,01				
Instancia 31	30	3584,09	8522,95				
Instancia 32	60	6333,46	15054,87				
Instancia 33	90	8779,26	20860,79				
Instancia 34	120	13836,67	32894,50				
Instancia 35	160	18584,39	44181,37				
Instancia 36	200	24438,29	58129,63				
Instancia 37	250	34149,02	81275,92				
Instancia 38	300	32033,86	76143,27				
Instancia 39	360	43020,60	102306,86				
Instancia 40	420	52687,03	125358,01				
Instancia 41	590	75512,35	179641,17				
Instancia 42	660	82445,85	196110,89				
Instancia 1	250			15613,71	36643,45	36755,45	36867,45
Instancia 2	318			19183,18	44976,84	45117,84	45258,84

Tabla 7- 2. Resultados para el algoritmo First Fit (horas)

7.3 Resultados para el algoritmo por volumen

Algoritmo por volumen	PIEZAS	CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/c HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/c HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/c HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/c HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/c HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1103,50	2628,64				
Instancia 2	10	1593,69	3799,14				
Instancia 3	14	1230,30	2926,26				
Instancia 4	16	1758,26	4170,51				
Instancia 5	18	1683,81	4006,55				
Instancia 6	20	3172,38	7549,62				
Instancia 7	15	1874,24	4455,76				
Instancia 8	18	2316,74	5513,91				
Instancia 9	21	1895,51	4503,78				
Instancia 10	24	2727,53	6496,85				
Instancia 11	27	3111,50	7397,67				
Instancia 12	30	3869,75	9212,05				
Instancia 13	20	2645,73	6300,03				
Instancia 14	24	3032,24	7209,26				
Instancia 15	28	3218,25	7655,57				
Instancia 16	32	3771,08	8981,40				
Instancia 17	36	4690,33	11161,01				
Instancia 18	40	4597,94	10934,83				
Instancia 19	25	5287,65	12603,04				
Instancia 20	30	3609,23	8597,99				
Instancia 21	35	4815,96	11480,23				
Instancia 22	40	5864,88	13969,37				
Instancia 23	60	7496,83	17841,45				
Instancia 24	80	8598,08	20458,06				
Instancia 25	100	10522,78	25039,95				
Instancia 26	120	12115,24	28787,71				
Instancia 27	140	16205,43	38556,79				
Instancia 28	160	19221,62	45737,59				
Instancia 29	180	24091,59	57342,58				
Instancia 30	200	24956,07	59401,78				
Instancia 31	30	3555,99	8466,75				
Instancia 32	60	6301,80	14991,57				
Instancia 33	90	8771,26	20844,84				
Instancia 34	120	13813,75	32848,70				
Instancia 35	160	18529,09	44070,71				
Instancia 36	200	24375,50	58004,10				
Instancia 37	250	34094,30	81166,52				
Instancia 38	300	31939,46	75954,49				
Instancia 39	360	42884,17	102033,98				
Instancia 40	420	52617,67	125219,22				
Instancia 41	590	75334,31	179285,19				
Instancia 42	660	82218,88	195656,85				
Instancia 1	250			15531,22	36480,40	36590,40	36700,40
Instancia 2	318			19021,20	44655,99	44793,99	44931,99

Tabla 7- 3. Resultados para el algoritmo por volumen (horas)

7.4 Resultados para el algoritmo ponderado

Algoritmo ponderado	PIEZAS	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1103,50	2628,64				
Instancia 2	10	1593,69	3799,14				
Instancia 3	14	1230,30	2926,26				
Instancia 4	16	1749,35	4152,69				
Instancia 5	18	1683,81	4006,55				
Instancia 6	20	3149,02	7502,86				
Instancia 7	15	1874,24	4455,76				
Instancia 8	18	2318,86	5518,15				
Instancia 9	21	1895,51	4503,78				
Instancia 10	24	2712,47	6466,77				
Instancia 11	27	3080,30	7335,27				
Instancia 12	30	3869,17	9210,88				
Instancia 13	20	2645,73	6300,03				
Instancia 14	24	3032,24	7209,26				
Instancia 15	28	3209,20	7637,47				
Instancia 16	32	3771,08	8981,40				
Instancia 17	36	4690,33	11161,00				
Instancia 18	40	4602,92	10944,78				
Instancia 19	25	5287,65	12603,04				
Instancia 20	30	3609,23	8597,99				
Instancia 21	35	4813,74	11475,76				
Instancia 22	40	5864,88	13969,37				
Instancia 23	60	7481,69	17811,16				
Instancia 24	80	8592,52	20446,85				
Instancia 25	100	10531,61	25057,65				
Instancia 26	120	12085,98	28729,23				
Instancia 27	140	16202,75	38551,42				
Instancia 28	160	19212,51	45719,41				
Instancia 29	180	24095,10	57349,60				
Instancia 30	200	24927,45	59344,60				
Instancia 31	30	3552,89	8460,56				
Instancia 32	60	6293,41	14974,76				
Instancia 33	90	8741,69	20785,64				
Instancia 34	120	13806,29	32833,78				
Instancia 35	160	18517,47	44047,55				
Instancia 36	200	24349,31	57951,68				
Instancia 37	250	34060,45	81098,76				
Instancia 38	300	31889,41	75854,41				
Instancia 39	360	42882,87	102031,42				
Instancia 40	420	52551,01	125086,01				
Instancia 41	590	75368,82	179354,18				
Instancia 42	660	82169,10	195557,36				
Instancia 1	250			15506,95	36431,83	36541,83	36651,83
Instancia 2	318			19001,26	44616,02	44754,02	44892,02

Tabla 7- 4. Resultados algoritmo ponderado (horas).

7.5 Resultados para el algoritmo por cociente

Algoritmo por cociente	PIEZAS	CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm ³ HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1109,70	2641,00				
Instancia 2	10	1589,28	3790,33				
Instancia 3	14	1230,30	2926,26				
Instancia 4	16	1741,05	4136,09				
Instancia 5	18	1676,24	3991,41				
Instancia 6	20	3153,88	7512,59				
Instancia 7	15	1863,15	4433,54				
Instancia 8	18	2317,04	5514,51				
Instancia 9	21	1893,72	4500,20				
Instancia 10	24	2697,38	6436,58				
Instancia 11	27	3076,70	7328,09				
Instancia 12	30	3862,17	9196,90				
Instancia 13	20	2632,78	6274,12				
Instancia 14	24	2983,25	7111,27				
Instancia 15	28	3182,64	7584,34				
Instancia 16	32	3743,09	8925,39				
Instancia 17	36	4650,85	11081,82				
Instancia 18	40	4541,98	10822,91				
Instancia 19	25	5281,25	12590,29				
Instancia 20	30	3597,46	8574,45				
Instancia 21	35	4810,25	11468,82				
Instancia 22	40	5812,65	13864,89				
Instancia 23	60	7411,85	17671,45				
Instancia 24	80	8532,31	20326,45				
Instancia 25	100	10399,75	24793,89				
Instancia 26	120	11901,63	28360,49				
Instancia 27	140	16063,25	38272,54				
Instancia 28	160	18971,78	45237,93				
Instancia 29	180	23796,15	56751,68				
Instancia 30	200	24657,57	58804,85				
Instancia 31	30	3546,67	8448,11				
Instancia 32	60	6220,49	14828,98				
Instancia 33	90	8601,30	20504,91				
Instancia 34	120	13603,88	32429,01				
Instancia 35	160	18309,95	43632,48				
Instancia 36	200	24059,31	57371,73				
Instancia 37	250	33711,36	80400,52				
Instancia 38	300	31427,07	74929,80				
Instancia 39	360	42333,89	100933,50				
Instancia 40	420	51901,47	123786,83				
Instancia 41	590	74373,80	177364,11				
Instancia 42	660	81142,55	193504,22				
Instancia 1	250			15645,92	36704,90	36819,90	36934,90
Instancia 2	318			19216,14	45038,97	45183,97	45328,97

Tabla 7- 5. Resultados algoritmo por cociente (horas).

7.6 Resultados para el algoritmo por tiempo de fabricación

Algoritmo por tiempo de fabricación	PIEZAS	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 1600 cm2 Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,030864 h/cm3 HT=0,7 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 1h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm	CAP: 625 cm2 Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm3 HT=1,4 h/cm
Instancia 1	10	1103,50	2628,64				
Instancia 2	10	1593,69	3799,14				
Instancia 3	14	1230,30	2926,26				
Instancia 4	16	1749,35	4152,69				
Instancia 5	18	1683,81	4006,55				
Instancia 6	20	3149,02	7502,86				
Instancia 7	15	1874,24	4455,76				
Instancia 8	18	2317,85	5516,10				
Instancia 9	21	1895,51	4503,80				
Instancia 10	24	2710,20	6462,20				
Instancia 11	27	3080,30	7335,27				
Instancia 12	30	3869,17	9210,88				
Instancia 13	20	2645,73	6300,03				
Instancia 14	24	3002,57	7149,95				
Instancia 15	28	3205,70	7630,46				
Instancia 16	32	3755,31	8949,82				
Instancia 17	36	4690,33	11161,00				
Instancia 18	40	4591,58	10922,12				
Instancia 19	25	5287,65	12603,04				
Instancia 20	30	3609,23	8597,99				
Instancia 21	35	4799,56	11447,39				
Instancia 22	40	5861,65	13962,87				
Instancia 23	60	7488,80	17825,38				
Instancia 24	80	8599,10	20460,02				
Instancia 25	100	10520,91	25036,27				
Instancia 26	120	12070,91	28698,96				
Instancia 27	140	16177,91	38501,84				
Instancia 28	160	19199,39	45693,84				
Instancia 29	180	24034,65	57228,65				
Instancia 30	200	24938,52	59366,65				
Instancia 31	30	3555,09	8464,95				
Instancia 32	60	6293,49	14974,96				
Instancia 33	90	8765,76	20833,83				
Instancia 34	120	13785,99	32793,19				
Instancia 35	160	18494,95	44002,45				
Instancia 36	200	24342,89	57938,83				
Instancia 37	250	34003,15	80984,14				
Instancia 38	300	31907,61	75890,79				
Instancia 39	360	42860,99	101987,63				
Instancia 40	420	52498,04	124980,01				
Instancia 41	590	75279,79	179176,12				
Instancia 42	660	82192,08	195603,36				
Instancia 1	250			15538,81	36457,19	36567,19	36677,19
Instancia 2	318			19072,63	44681,50	44819,50	44957,50

Tabla 7- 6. Resultados del algoritmo por tiempo de fabricación (horas).

7.7 Comparaciones entre algoritmos

CAP: 1600 cm ² Hmax = 40 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	PIEZAS	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD
		Algoritmo por altura	Algoritmo FIFO	Algoritmo First Fit	Algoritmo por volumen	Algoritmo ponderado	Algoritmo por cociente	Algoritmo por tiempo de fabricación	Algoritmo por superficie
Instancia 1	10	0,004	0,025	0,023	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
Instancia 2	10	0,000	0,009	0,009	0,002	0,002	0,000	0,002	0,001
Instancia 3	14	0,000	0,015	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016
Instancia 4	16	0,000	0,018	0,014	0,008	0,004	0,000	0,004	0,008
Instancia 5	18	0,000	0,014	0,014	0,005	0,005	0,001	0,005	0,013
Instancia 6	20	0,001	0,013	0,009	0,006	0,000	0,001	0,000	0,002
Instancia 7	15	0,000	0,008	0,002	0,005	0,005	0,000	0,005	0,012
Instancia 8	18	0,000	0,025	0,013	0,001	0,002	0,001	0,001	0,009
Instancia 9	21	0,000	0,028	0,011	0,004	0,004	0,003	0,004	0,010
Instancia 10	24	0,000	0,020	0,009	0,009	0,005	0,000	0,004	0,007
Instancia 11	27	0,000	0,024	0,014	0,010	0,001	0,000	0,001	0,013
Instancia 12	30	0,000	0,019	0,008	0,005	0,005	0,004	0,005	0,006
Instancia 13	20	0,000	0,022	0,013	0,004	0,004	0,000	0,004	0,010
Instancia 14	24	0,000	0,028	0,019	0,014	0,014	0,000	0,005	0,013
Instancia 15	28	0,000	0,021	0,010	0,009	0,007	0,000	0,006	0,012
Instancia 16	32	0,000	0,021	0,013	0,006	0,006	0,000	0,003	0,011
Instancia 17	36	0,000	0,020	0,009	0,008	0,008	0,001	0,008	0,016
Instancia 18	40	0,000	0,016	0,012	0,012	0,013	0,001	0,010	0,010
Instancia 19	25	0,000	0,013	0,010	0,005	0,005	0,004	0,005	0,007
Instancia 20	30	0,000	0,013	0,015	0,004	0,004	0,001	0,004	0,009
Instancia 21	35	0,000	0,017	0,013	0,004	0,004	0,003	0,001	0,006
Instancia 22	40	0,000	0,017	0,011	0,008	0,008	0,000	0,007	0,011
Instancia 23	60	0,000	0,018	0,013	0,010	0,008	0,000	0,009	0,011
Instancia 24	80	0,000	0,022	0,013	0,009	0,008	0,003	0,009	0,015
Instancia 25	100	0,000	0,023	0,017	0,011	0,012	0,002	0,011	0,015
Instancia 26	120	0,000	0,025	0,018	0,016	0,014	0,001	0,013	0,012
Instancia 27	140	0,000	0,020	0,014	0,009	0,009	0,002	0,008	0,010
Instancia 28	160	0,000	0,024	0,014	0,012	0,012	0,001	0,011	0,011
Instancia 29	180	0,000	0,018	0,013	0,011	0,012	0,001	0,009	0,012
Instancia 30	200	0,000	0,022	0,014	0,011	0,010	0,001	0,011	0,012
Instancia 31	30	0,000	0,012	0,012	0,005	0,004	0,003	0,005	0,012
Instancia 32	60	0,000	0,025	0,017	0,013	0,012	0,002	0,012	0,014
Instancia 33	90	0,000	0,025	0,018	0,017	0,014	0,001	0,017	0,012
Instancia 34	120	0,000	0,020	0,016	0,014	0,014	0,001	0,012	0,012
Instancia 35	160	0,000	0,020	0,014	0,012	0,011	0,002	0,010	0,011
Instancia 36	200	0,000	0,023	0,015	0,012	0,011	0,001	0,011	0,012
Instancia 37	250	0,000	0,019	0,012	0,011	0,010	0,001	0,008	0,010
Instancia 38	300	0,000	0,024	0,017	0,015	0,014	0,001	0,014	0,013
Instancia 39	360	0,000	0,023	0,015	0,012	0,012	0,001	0,012	0,012
Instancia 40	420	0,000	0,021	0,014	0,013	0,012	0,001	0,011	0,013
Instancia 41	590	0,000	0,021	0,014	0,012	0,013	0,001	0,012	0,011
Instancia 42	660	0,000	0,022	0,015	0,012	0,012	0,001	0,012	0,012

Tabla 7- 7. Comparación RPD, capacidad de 1600 cm², SET=2h, VT=0,074074 h/cm³, HT=1,4 h/cm

CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 2h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	RPD								
	PIEZAS	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD
		Algoritmo por altura	Algoritmo FIFO	Algoritmo First Fit	Algoritmo por volumen	Algoritmo ponderado	Algoritmo por cociente	Algoritmo por tiempo de fabricación	Algoritmo por superficie
Instancia 1	250	0,000	0,039	0,021	0,016	0,015	0,023	0,015	0,022
Instancia 2	318	0,000	0,039	0,024	0,016	0,015	0,025	0,017	0,019

Tabla 7- 8. Comparación RPD, capacidad de 625 cm², SET=2h, VT=0,074074 h/cm³, HT=1,4 cm/h

CAP: 625 cm ² Hmax = 32,5 cm SET = 3h VT=0,074074 h/cm ³ HT=1,4 h/cm	RPD								
	PIEZAS	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD	RPD
		Algoritmo por altura	Algoritmo FIFO	Algoritmo First Fit	Algoritmo por volumen	Algoritmo ponderado	Algoritmo por cociente	Algoritmo por tiempo de fabricación	Algoritmo por superficie
Instancia 1	250	0,000	0,040	0,021	0,016	0,015	0,023	0,015	0,022
Instancia 2	318	0,000	0,040	0,024	0,016	0,015	0,025	0,017	0,019

Tabla 7- 9. Comparación RPD, capacidad de 625 cm², SET=3h, VT=0,074074 h/cm³, HT=1,4 cm/h

