

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Modelado y resolución de problemas de programación de la producción en fabricación aditiva con múltiples orientaciones de piezas y mínimo tiempo de finalización

Autor: Fernando Pouso Bastida

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Organización Industrial

**Modelado y resolución de problemas de
programación de la producción en fabricación
aditiva con múltiples orientaciones de piezas y
mínimo tiempo de finalización**

Autor:

Fernando Pouso Bastida

Tutor:

Ignacio Eguía Salinas

Catedrático de Universidad

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Modelado y resolución de problemas de programación de la producción en fabricación aditiva con múltiples orientaciones de piezas y mínimo tiempo de finalización

Autor: Fernando Pouso Bastida

Tutor: Ignacio Eguía Salinas

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

*A mi familia y amigos, que me han
acompañado todo este camino y
siempre confiaron en mi.*

Agradecimientos

Con este trabajo pongo fin a mi etapa como estudiante de ingeniería. Han sido 4+1 años de aprendizaje y constantes desafíos, y no podría haber llegado hasta aquí sin el apoyo incondicional de mi familia.

A mis amigos, tanto los que he conocido en el grado como los que ya me acompañaban, gracias por hacer mejores los buenos y los malos momentos, habéis sido un gran apoyo.

Resumen

En este trabajo, se modelan y resuelven varios problemas de programación de la producción en máquinas de fabricación aditiva con múltiples orientaciones de piezas y minimizando el tiempo de finalización. Inicialmente, se linealizan y adaptan los modelos matemáticos propuestos por otros autores en la literatura. Seguidamente, se plantean dichos modelos en formato LINGO y se emplea este software para la resolución de los problemas. Finalmente, se plasman los resultados obtenidos tras la experimentación con los tres modelos y se exponen las conclusiones del proyecto.

Abstract

In this work, several production scheduling problems are modeled and solved in additive manufacturing machines with multiple part orientations and minimizing completion time. Initially, the mathematical models proposed by other authors in the literature are linearized and adapted. Subsequently, these models are formulated in LINGO format, and this software is used to solve the problems. Finally, the results obtained from the experimentation with the three models are presented, and the conclusions of the project are exposed.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Objeto del Trabajo Fin de Grado	1
1.1. <i>Objetivo del trabajo</i>	1
1.2. <i>Estructura del trabajo</i>	1
2 La Programación de la Producción en Fabricación Aditiva	3
2.1. <i>Introducción a la fabricación aditiva</i>	3
2.2. <i>Planificación de la producción en Fabricación Aditiva</i>	5
2.3. <i>Clasificación de problemas.</i>	8
2.4. <i>Definición y modelado de problemas a tratar en este trabajo con 1 orientación</i>	9
2.4.1. Problema M/M/S: “Multi-Build Nesting and Scheduling problem in a single AM machine”.	10
2.4.2. Problema M/M/iM: “Nesting and Scheduling problem with identical parallel AM machines”.	12
2.4.3. Problema M/M/nM: “Nesting and Scheduling problem with non-identical parallel machines”	15
3 Modelado de los Problemas	19
3.1. <i>Modelos lineales de los problemas de una orientación</i>	19
3.1.1 Problema M/M/S minimizando el makespan (1 Orientación).	19
3.1.2 Problema M/M/iM minimizando el makespan (1 Orientación).	20
3.1.3 Problema M/M/nM minimizando el makespan (1 Orientación).	21
3.2. <i>Múltiples orientaciones en Fabricación Aditiva</i>	21
3.3. <i>Modelado del problema M/M/nM con múltiples orientaciones.</i>	22
4 Modelado en LINGO	25
4.1. <i>Introducción a LINGO</i>	25
4.2. <i>Modelos en LINGO para 1 orientación</i>	25
4.2.1. Modelo M/M/S 1 orientación	25
4.2.2. Modelo M/M/iM 1 orientación	27
4.2.3. Modelo M/M/nM 1 orientación	28
4.3. <i>Modelos en LINGO para 2 y 3 orientaciones</i>	29
5 Experimentación y Resultados Obtenidos	33
5.1. <i>Generación de instancias</i>	33
5.2. <i>Resultados computacionales</i>	34
5.2.1. Comparación para problemas con 1 orientación.	34
5.2.2. Comparación para problemas con 2 y 3 orientaciones.	36
5.2.3. Efecto de la multiorientación de piezas.	42

6 Conclusiones

45

Referencias

47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1. Relación altura-superficie de las piezas.	33
Tabla 5-2. Datos para el problema 1 (Kucukkoc,2019) con 2 orientaciones.	34
Tabla 5-3. Resultados M/M/S 1O.	34
Tabla 5-4. Resultados M/M/iM 1O.	35
Tabla 5-5. Resultados M/M/nM 1O.	36
Tabla 5-6. Comparación 2O y 3O M/M/S.	37
Tabla 5-7. Comparación 2O y 3O M/M/iM.	39
Tabla 5-8. Comparación 2O y 3O M/M/nM.	41
Tabla 5-9. Valor medio Cmax M/M/S.	42
Tabla 5-10. Efecto de la multiorientación M/M/S.	42
Tabla 5-11. Valor medio Cmax M/M/iM.	43
Tabla 5-12. Efecto de la multiorientación M/M/iM.	43
Tabla 5-13. Valor medio Cmax M/M/nM.	44
Tabla 5-14. Efecto de la multiorientación M/M/nM.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Descripción del problema.	6
Figura 2-2. <i>Build Volume</i> .	6
Figura 2-3. <i>Nesting</i> y <i>Scheduling</i> en fabricación aditiva.	7
Figura 2-4. Asignación de partes a trabajos en 2D.	8
Figura 2-5. Clasificación de los problemas.	8
Figura 2-6. Secuencia Single-Machine.	10
Figura 2-7. Reparto de geometrías.	10
Figura 3-1. Distintas orientaciones de una sola pieza.	22
Figura 4-1. SETS Y DATA M/M/S 1O.	26
Figura 4-2. Exportación de los resultados a fichero de texto.	27
Figura 4-3. Función objetivo y restricciones M/M/S 1O.	27
Figura 4-4. SETS Y DATA M/M/iM 1O.	28
Figura 4-5. Función objetivo y restricciones M/M/iM 1O.	29
Figura 4-6. SETS y DATA M/M/nM 1O.	29
Figura 4-7. Función objetivo y restricciones M/M/nM 1O.	30
Figura 4-8. SETS y DATA M/M/S 2O.	30
Figura 4-9. Función objetivo y restricciones M/M/S 2O.	31
Figura 5-1. Comparativa M/M/S.	42
Figura 5-2. Comparativa M/M/iM.	43
Figura 5-3. Comparativa M/M/nM.	44

Notación

FDM	Fused Filament Modeling
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
BJ	Binder Jetting
SLM	Selective Laser Melting
AM	Fabricación aditiva
DED	Directed energy deposition
ME	Material extrusion
PBF	Powder bed fusion
VP	Vat photopolymerization
1O	Una orientación
2O	Dos orientaciones
3O	Tres orientaciones
Cmax	Makespan

1 OBJETO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

1.1. Objetivo del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es el modelado mediante programación lineal mixta entera y su resolución de problemas de programación de la producción de múltiples partes en máquinas de fabricación aditiva, comúnmente conocidas como “impresoras 3D”, con el criterio de minimizar el tiempo máximo de fabricación de todas las partes (*makespan*) y añadiendo como variante del problema la posibilidad de múltiples orientaciones de las partes para su fabricación. Para ello, se han analizado los modelos matemáticos existentes en la literatura y se han linealizado y adaptados a múltiples orientaciones.

La fabricación aditiva ha transformado la forma de producción, al unir todas las operaciones en una única máquina implica un ahorro de costes y espacio significativo. Sin embargo, uno de los aspectos evidentes a mejorar de esta nueva tecnología son los tiempos de producción, ya que son bastante elevados hoy en día, es por ello, que los modelos planteados en este trabajo se centran en minimizar el tiempo máximo de terminación de los trabajos.

Para llevar a cabo la resolución de dichos modelos de forma óptima, se ha empleado un software de construcción y resolución de modelos de optimización matemática, conocido como LINGO.

El objetivo de este trabajo es dar solución a problemas reales de programación de la producción y experimentar con una serie de datos para alcanzar el óptimo de cada problema.

1.2. Estructura del trabajo

A continuación, se explica la estructura del trabajo, dividido en 6 capítulos:

Capítulo 1: “Objeto del trabajo”, el capítulo en el que nos encontramos tiene una función introductoria, se explica el motivo de elección de los problemas que se resolverán más adelante y el objetivo del trabajo, además de establecer la estructura que seguirá el proyecto.

Capítulo 2: “La Programación de la Producción en Fabricación Aditiva”, se explica en que consiste la fabricación aditiva y las diferentes técnicas existentes, adicionalmente, se introduce a los problemas en estudio y se explican los problemas abordados en la literatura, junto con las técnicas de fabricación aditiva que se estudian en la literatura en este campo. Finalmente, se describen las características de los problemas a resolver.

Capítulo 3: “Modelado de los problemas”, en este capítulo se linealizarán los modelos propuestos para una orientación. Además, se explica el concepto de la multiorientación de piezas. Por último, se explica como afecta la multiorientación de piezas al último modelo.

Capítulo 4: “Modelado en LINGO”, a diferencia del anterior capítulo, se explica el modelado de los diferentes problemas en LINGO, para una y varias orientaciones.

Capítulo 5: “Experimentación y resultados obtenidos”, tras haber explicado el modelado de los problemas es el momento de llevar a cabo la experimentación y ver cómo afecta la multiorientación de piezas a los modelos. En primer lugar, se explica cómo se han generado las diferentes instancias y se exponen los resultados obtenidos para una y varias orientaciones. Por último, se analiza el efecto de añadir múltiples orientaciones a las piezas.

Capítulo 6: “Conclusiones”, en el cierre de este trabajo se exponen las conclusiones halladas tras la

finalización de este, y las futuras líneas de mejora de una tecnología tan novedosa como es la fabricación aditiva.

2 LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva, o impresión 3D, ha causado un gran revuelo en la industria actual, irrumpiendo con muchísima fuerza en el mercado gracias a la eficiencia y precisión que ofrecen sus técnicas de fabricación. En este capítulo se describe la historia de la fabricación aditiva y la relevancia que ha cobrado en los últimos años. Se explican también los problemas que se estudian en la literatura y los procesos de fabricación abordados. Finalmente, se exponen los diferentes tipos de problema que se modelarán y resolverán en los siguientes capítulos.

2.1. Introducción a la fabricación aditiva

La fabricación aditiva, también conocida como fabricación por adición, es un conjunto de tecnologías que permiten la construcción de objetos 3D de forma secuencial en un proceso de adición de capas de material (plástico, metal, yeso). A través de la creación de un diseño por ordenador o un software de modelado (CAD) se diseña una guía de impresión que es la que la máquina usa de referencia para realizar el modelo capa a capa (*What Is Additive Manufacturing* | *GE Additive*, n.d.).

Hoy en día, existen varias tecnologías de fabricación aditiva y seguramente falten muchas por descubrir. A continuación, se detallan las principales tecnologías de producción dependiendo del material empleado.

Para plásticos, las técnicas mas comunes son (*What Is Additive Manufacturing* | *GE Additive*, n.d.):

- *Fused Filament Modeling (FDM)*: El modelado por deposición fundida es un proceso de impresión 3D en el que se utilizan hilos finos de filamento termoplástico en una máquina, en la que un cabezal de impresión o boquilla derrite el material y lo expulsa en un grosor típicamente de 0.20 mm. El material se calienta hasta alrededor de 2°C por encima de su punto de fusión, lo que provoca que se solidifique de manera casi instantánea después de su salida y se suelda friamente a las capas anteriores (Prakash et al., 2018).
- *Stereolithography (SLA)*: La estereolitografía es la técnica de prototipado rápido más común que emplea la fabricación capa por capa, basada en la fotopolimerización mediante el uso de un láser ultravioleta. Normalmente, se emplea resina, la cual es solidificada por el láser ultravioleta. Cuando se solidifica una capa, la plataforma de la máquina se desplaza hacia abajo para poder seguir añadiendo resina y formar la siguiente capa (Prakash et al., 2018).
- *Digital Light Processing (DLP)*: El procesado por luz digital, es otra tecnología de fabricación aditiva de capa por capa. En este caso, el haz de luz ultravioleta se modula con un microespejo para dirigirlo a la capa que se está tratando y darle la forma deseada. A diferencia de las dos anteriores tecnologías, la impresión DLP no requiere de una estructura de soporte para la impresión de componentes huecos o porosos (Li et al., 2021).
- *Selective Laser Sintering (SLS)*: Es un proceso en el que se sintetiza o funde el polvo mediante la utilización de un láser de CO_2 . La cámara se calienta hasta casi el punto de fusión del material, el láser une el polvo en un área particular para cada capa determinada por el diseño. Las partículas se encuentran libremente en una cama, que se controla mediante un pistón que baja la misma cantidad de espesor de capa cada vez que se completa una capa. Aunque lo hemos clasificado en plásticos, este proceso ofrece

una gran variedad de materiales que se pueden utilizar: metales, combinaciones de metales, combinaciones de metales y polímeros y combinaciones de metales y cerámica, además de los plásticos (Prakash et al., 2018).

En cuanto a metales, las tecnologías de fabricación aditiva más comunes son (*What Is Additive Manufacturing* | *GE Additive*, n.d.):

- *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*: DMLS es una técnica avanzada de fabricación aditiva basada en láser que utiliza los datos de diseño 3D para desarrollar un componente mediante una técnica de consolidación capa por capa. El proceso comienza con la aplicación de una capa fina de material en polvo en la plataforma de construcción. Un haz de láser de alta potencia escanea sobre el patrón descrito creado por el diseñador y después de cada capa, el haz fusiona el polvo en posiciones precisas utilizando una óptica de escaneo láser. Simultáneamente, la plataforma de construcción sigue bajando la cuchilla recolectora extendiendo el polvo en la plataforma después de cada escaneo. El proceso DMLS utiliza la sinterización en fase líquida para unir las partículas metálicas (Nandy et al., 2019).
- *Electron Beam Melting (EBM)*: La fusión por haz de electrones es un proceso de prototipado rápido, produce piezas metálicas completamente densas directamente a partir de polvo metálico, con las propiedades características del material objetivo. El sistema EBM construye estructuras de abajo hacia arriba, a través de un escaneo con el haz de electrones, para fundir selectivamente áreas específicas de polvo. Es un proceso de fabricación aditiva de capa por capa que no se detiene hasta que se construye la última capa de la pieza (Kalita, 2010).
- *Binder Jetting*: La inyección de aglutinante es un proceso de fabricación aditiva en el cual, un cabezal de impresión deposita un agente aglutinante líquido sobre una fina capa de partículas de metal, arena, cerámica o compuestos. Al igual que los anteriores, el proceso se repite capa por capa hasta terminar el objeto (*What Is Additive Manufacturing* | *GE Additive*, n.d.).
- *Selective Laser Melting (SLM)*: Es uno de los procesos de fusión en cama de polvo más utilizados en la industria de la fabricación aditiva. Utiliza un láser que funde y une los polvos metálicos. Similar al *Binder Jetting*, se deposita una capa fina de polvo sobre una placa o en la capa depositada previamente y el láser funde y une las partículas de polvo selectivamente. El proceso tiene lugar en una cámara cerrada, generalmente llena con un gas inerte, dependiendo de la reactividad del polvo (Gokuldoss et al., 2017).

2.1.1 Evolución de la fabricación aditiva

En 1992, se comercializan las primeras impresoras SLA (“*Stereolithography*”). Estas impresoras, presentaban algunos defectos e imperfecciones, pero eran capaces de fabricar objetos capa por capa. En estos tiempos, las máquinas de impresión 3D ya eran capaces de producir en una sola noche una pieza bastante compleja en cuanto a estructura y fabricación.

Fue en 1999, cuando la fabricación aditiva irrumpió en el campo de la medicina, se aplicó en un recubrimiento sintético a partir de las células de un paciente, con el objetivo de dar solución a determinados órganos. Fue un momento histórico para la fabricación aditiva.

Para 2002, imprimir un órgano en tres dimensiones se convirtió en un hecho posible, concretamente se imprimió un riñón en miniatura. Gracias a este logro, se siguió investigando y desarrollando, dando lugar a la llamada “Medicina Regenerativa”.

En 2006, se crea la primera máquina SLS que supuso un gran avance, ya que se podían fundir materiales durante el proceso de impresión. Con esto, ya se podía empezar a pensar en la fabricación de prótesis y piezas industriales hechas con diversos materiales.

A partir de 2011, la fabricación aditiva se utilizaba en todo tipo de industrias. Se produce un aumento de la investigación y producción a gran escala, así como en consumo (*La Historia de La Impresora 3D: Los Orígenes de Las Primeras Máquinas*, n.d.).

2.1.2 Aplicaciones, ventajas y desventajas de la fabricación aditiva.

En comparación con los procesos convencionales de producción, la fabricación aditiva mejora en muchos aspectos lo ya conocido, pero como toda tecnología incipiente, necesita pulir algunos detalles, especialmente para poder competir con los procesos convencionales a la hora de realizar producciones en masa.

En primer lugar, la fabricación aditiva supone un uso de materiales y de recursos mucho más eficiente. A diferencia de los procesos convencionales, en los que se desecha una gran cantidad de material, la fabricación aditiva emplea los materiales brutos de forma eficiente para construir las piezas capa por capa, dichos materiales se pueden reutilizar con un procesamiento mínimo. Además, no se necesitan de herramientas adicionales (plantillas, herramientas de corte, refrigerantes...) para llevar a cabo el proceso de fabricación (Prakash et al., 2018).

Las dos ventajas mencionadas, desembocan en otras dos de forma indirecta. La eficiencia en cuanto a materiales y recursos provoca una disminución de los costes de producción, ya que no se desperdicia tanto material ni son necesarias tantas máquinas y herramientas, además de un ahorro de espacio considerable. Esto último, se debe a que todas las operaciones se concentran en una máquina, eliminando la cadena de montaje, en la que el producto pasa por varias máquinas hasta estar completamente ensamblado.

Además, las máquinas de fabricación aditiva suponen un avance en cuanto a flexibilidad en las partes y en la producción. Es decir, es posible construir piezas rígidas con partes flexibles y viceversa, eliminando así el dilema de sacrificar la funcionalidad de una pieza por la dificultad de su manufactura. Aumenta también la flexibilidad en la producción, ya que este tipo de máquinas no requieren configuraciones costosas y son ideales para pequeñas producciones. La calidad del producto final no depende de la habilidad del operario, sino de la calidad del proceso. Como consecuencia, la producción puede adaptarse fácilmente a la demanda del cliente (Prakash et al., 2018).

Como ya se ha mencionado anteriormente, las ventajas expuestas no son suficientes para poder competir con los procesos convencionales de producción a la hora de producir grandes cantidades. Al utilizar polímeros líquidos y polvo compuesto de resina o yeso para realizar las diferentes capas, se hace complicado fabricar objetos de grandes dimensiones, debido a la falta de robustez de los materiales además del elevado tiempo de producción que implicaría. Adicionalmente, las piezas a menudo tienen un acabado rugoso y con imperfecciones, debido a los sobrantes de plástico o partículas de polvo de gran tamaño que se apilan unas sobre otras, dando al producto final un aspecto inacabado. Por último, aunque las máquinas de producción aditiva suponen un ahorro en costes de producción, hoy en día son consideradas una inversión costosa. El precio de una máquina va desde 3.000 hasta 30.000 dólares, sin incluir el coste de accesorios, resinas y los diferentes materiales necesarios (Prakash et al., 2018).

La fabricación aditiva ha irrumpido con gran fuerza en distintas áreas, como, por ejemplo, la medicina, la industria automotriz y aeroespacial o la joyería. Gracias a esta novedosa tecnología, se han realizado avances en la planificación de intervenciones quirúrgicas, además de ayudar a reproducir procedimientos quirúrgicos y actuar como herramienta de comunicación entre pacientes y cirujanos. En cuanto a la industria aeroespacial y automotriz, destaca por la facilidad para producir piezas complejas y de alto rendimiento a partir de metales como el titanio, sin necesidad alguna de procesado de dichas piezas, además de optimizar la producción en estos sectores. Por último, la fabricación aditiva ha ayudado a producir joyas de forma más sencilla, ya que es un proceso que requiere de un alto grado de técnica y esfuerzo manual además de un elevado tiempo de producción, debido a las complejas formas artísticas que tiene cada pieza (Abdulhameed et al., 2019).

Además de lo anteriormente citado, la fabricación aditiva avanza a pasos agigantados, entrando en cada vez más áreas de nuestra vida hoy en día impensables, como puede ser la impresión de alimentos en tres dimensiones.

2.2. Planificación de la producción en Fabricación Aditiva

El problema de planificación de la producción en máquinas de fabricación aditiva (AM) consiste en fabricar un conjunto de “n” partes asociadas a pedidos de clientes en un conjunto de “m” máquinas AM, donde cada pedido puede tener una fecha de entrega fija. Los estudios se realizan para el conjunto del total de las “n” partes, cada una de ellas con información de fecha de entrega del pedido, superficie de la parte y volumen que ocupa la parte. Las “n” partes se agrupan en “l” trabajos. Cada trabajo se realiza en una máquina AM y consiste en la ubicación y orientación de cada parte en una estructura de la máquina (“*build volume*”), de forma que no se puede superar la superficie ni el volumen máximo de la estructura. Las partes de una estructura se suelen fabricar simultáneamente (Chergui et al., 2018).

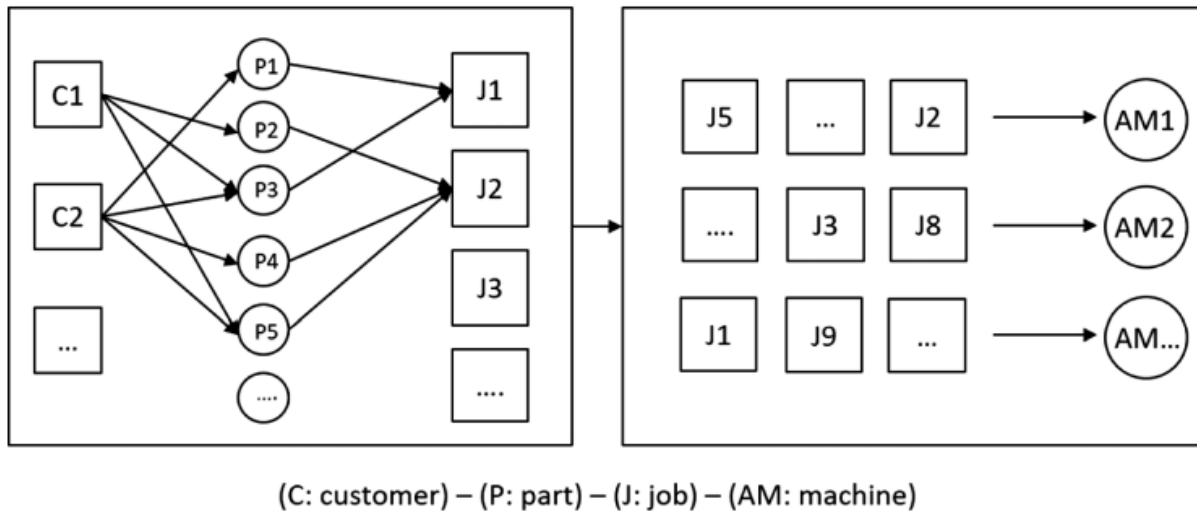


Figura 2-1. Descripción del problema.

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

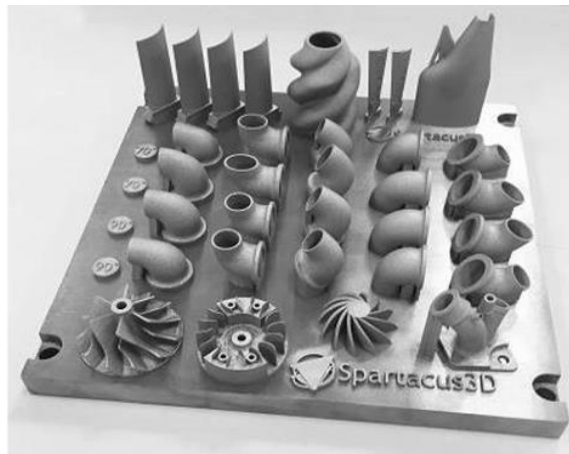


Figura 2-2. Build Volume.

2.2.1 Subproblemas: *Nesting* y *Scheduling* en fabricación aditiva

Un primer sub-problema, denominado “*Nesting*”, consiste en agrupar el conjunto de las “*n*” partes en un conjunto de “*l*” trabajos (cada trabajo es una estructura o “*build*”), así como ubicar y orientar cada parte en cada “*build*”. Cada trabajo tendrá un tiempo de producción en función de las partes asignadas y una fecha de finalización en función de la máquina y el orden en la misma. En este primer subproblema se situarán de forma óptima las partes en los espacios de las estructuras específicas de cada máquina AM considerando las limitaciones de superficie y volumen, y también los tiempos de procesado y las fechas de entrega (Chergui et al., 2018).

Una vez formados los trabajos con la asignación de partes correspondientes, el segundo sub-problema, denominado “*Scheduling*”, consiste en programar los “*l*” trabajos en las “*m*” máquinas. Cada máquina solo

puede procesar un trabajo a la vez. Se define este problema como la asignación de cada trabajo a una única máquina y la ordenación en el tiempo (secuenciación) de cada trabajo en la máquina asignada considerando minimizar los retrasos (Chergui et al., 2018).

La siguiente figura resume ambos sub-problemas:

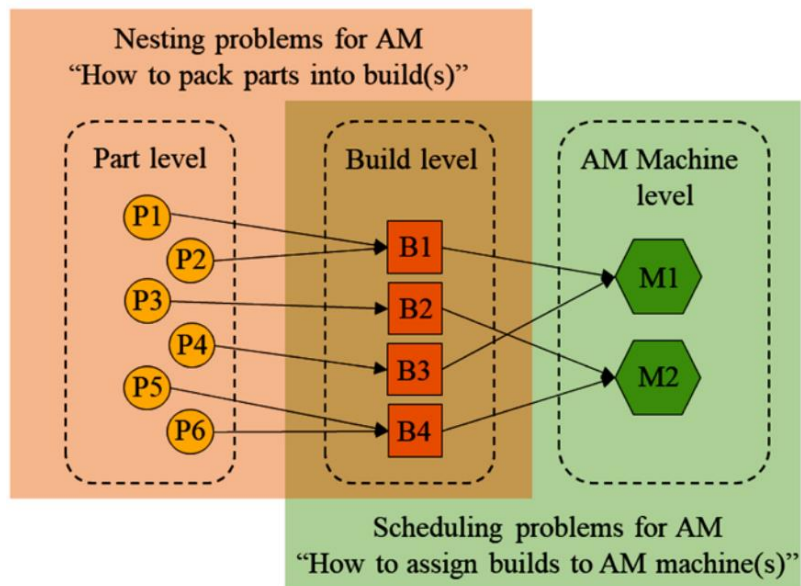


Figura 2-3. *Nesting* y *Scheduling* en fabricación aditiva.

En general, los objetivos de los problemas de Nesting en fabricación aditiva se basan en maximizar el número de piezas procesadas o minimizar el tiempo y el coste de una sola operación de una máquina AM. Por otro lado, los objetivos de los problemas de Scheduling se centran en mejorar la productividad mediante la secuenciación y asignación de cargas de trabajo a las máquinas AM (Oh et al., 2020).

La figura 2-4 muestra un ejemplo de asignación de 4 partes a dos trabajos en 2D.

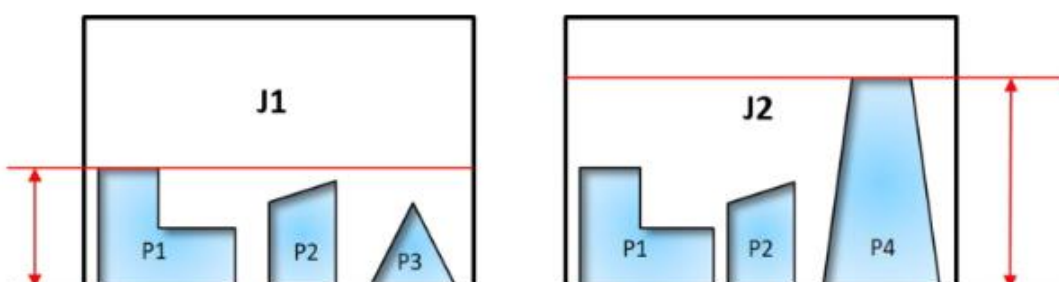


Figura 2-4. Asignación de partes a trabajos en 2D.

La línea roja representa la altura máxima del *build* o trabajo, viene dada por la pieza de mayor altura. Dicha línea, representa además el tiempo de terminación del trabajo en la máquina asignada, ya que como se ha resaltado anteriormente, la fabricación aditiva es un proceso de fabricación de capa por capa. Por ello, hasta que no se termina la última capa del objeto más alto, no termina el trabajo asignado en la máquina AM.

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

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

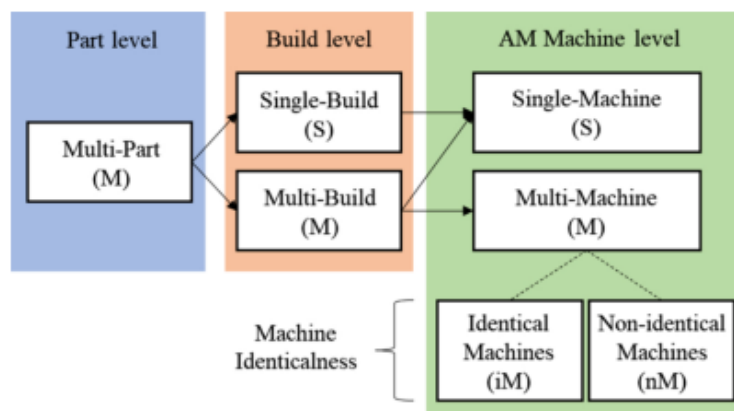


Figura 2-5. Clasificación de los problemas.

2.3. Clasificación de problemas.

Siguiendo la notación anterior, los problemas que se estudian en la literatura son los siguientes (Oh et al., 2020):

- M/S/S: Se centran en estudiar el problema “*Nesting*” en la parte de ubicación y orientación de las partes, similar al problema “*bin-packing*”.
- M/M/S: Se centran en agrupar las partes en diferentes estructuras (*nesting*), que se realizan en la misma máquina AM, por lo que hay que ordenar en el tiempo cada estructura (*scheduling*).

- M/M/iM: Como hay máquinas AM en paralelo idénticas, además hay que asignar las estructuras formadas a cada máquina y luego secuenciarlas en cada una.
- M/M/nM: Como las máquinas AM en paralelo no son idénticas, además hay que asignar las partes a una estructura de una máquina concreta, pues las estructuras pueden ser distintas en tamaño y forma.
- -/M/iM: Cada máquina AM sólo procesa una parte en la estructura, por lo que no es necesario el *nesting*.
- -/M/nM: Hay que considerar que cada parte se procesa en una estructura, pero cada máquina es diferente.

Para cada tipo de problema existen criterios específicos en los estudios y que son (Oh et al,2020):

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

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

Respecto a los procesos de fabricación aditiva, los que se estudian en la literatura en este campo son:

- *Binder jetting (BJ)*
- *Directed energy deposition (DED)*
- *Material extrusion (ME)*
- *Powder bed fusion (PBF)*
- *Vat photopolymerization (VP)*

Respecto a metodologías que se aplican en la literatura para la resolución de los problemas, destacan:

- Metaheurísticas tales como: *Genetic algorithm (GA)*, *Tabu search (TS)* y *Simulated annealing (SA)*.
- Heurísticas propias del problema.
- Modelos de programación matemática.
- SW comercial para *nesting*.

Finalmente, las funciones objetivo son muy diversas y dependen de los criterios seleccionados por los autores. En los casos de *nesting* son objetivos relacionados con la maximización del “*nesting rate*” o la minimización del “*maximum build height*”. En los casos de Scheduling, los objetivos se centran en la minimización de los retrasos/adelantos o de los costes o del tiempo de finalización del último trabajo (“*makespan*”).

2.4. Definición y modelado de problemas a tratar en este trabajo con 1 orientación

De todos los posibles problemas anteriormente presentados en la literatura, se van a explicar a continuación los tres tipos de problemas que se van a considerar para su estudio en el siguiente capítulo del trabajo. En todos ellos se van a usar como función objetivo minimizar el tiempo máximo de terminación de los trabajos o “*makespan*”.

2.4.1. Problema M/M/S: “Multi-Build Nesting and Scheduling problem in a single AM machine”.

Introducción al problema

El problema de programación de trabajos en una máquina de manera tradicional se corresponde en ordenar los trabajos $J = \{J_1, J_2, \dots\}$ a su paso por la única máquina disponible, creando la secuencia de paso. Los objetivos para seleccionar la secuencia óptima se pueden basar en: *lateness*, *tardiness*, *flow time*, *number of late job*, *makespan*, etc.

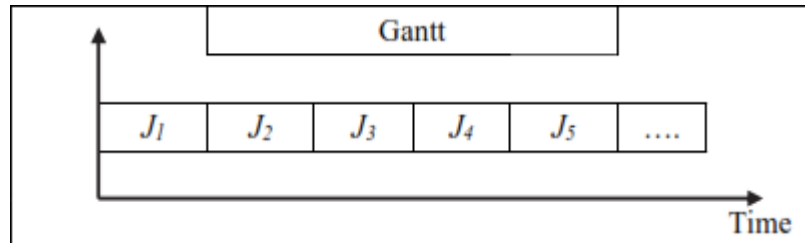


Figura 2-6. Secuencia *Single-Machine*.

La programación de trabajos en una máquina de fabricación aditiva (*AM machine*) es especial, pues se dispone de un conjunto de “ n_g ” tipos de partes a fabricar, denominados geometrías (“*Geometry types*”) que se repartirán entre un conjunto de trabajos, denominados estructuras (“*Build*”). Cada estructura en una máquina AM se construye sobre una base y, por tanto, con un espacio y volumen limitado para construir las geometrías.

Una solución del problema consistirá en un reparto de todas las cantidades de cada geometría entre un conjunto máximo de n_b Estructuras de forma que se cumplan las limitaciones de espacio y con un cierto criterio de optimalidad.

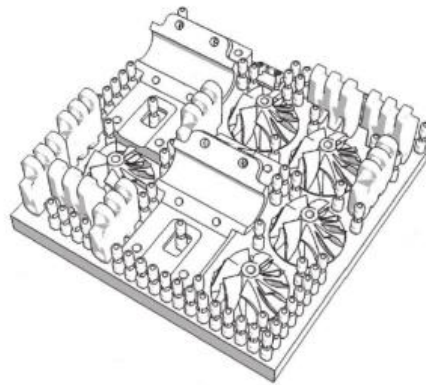


Figura 2-7. Reparto de geometrías.

Definición del problema

Se considera un conjunto de n_g geometrías o partes individuales a fabricar en una única máquina AM mediante un proceso basado en capas de polvo (“*powder bed fusion*”). Las partes se pueden agrupar formando un conjunto de n_b estructuras o trabajos (el valor de n_b se fija como un máximo a priori) de forma que hay que fijar el orden de paso de cada trabajo a su paso por la máquina.

De cada una de las n_g geometrías “ i ” que hay que fabricar se conoce:

- El volumen que ocupa la geometría “ V_i ” (cm^3).
- La sección o área que ocupa la geometría “ A_i ” (cm^2).

- La altura de la geometría “ H_i ” (cm).

Además, se conoce información del proceso en la máquina. La máquina AM se basa en la impresión 3D por capas de polvo sucesivas (“*powder bed fusion*”) sobre una bandeja inicial, de forma que la altura de la pieza más alta es la que marca el tiempo de producción del trabajo o estructura:

- El tiempo que se emplea por unidad de volumen del material “VT” (h/cm^3).
- El tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura y que se repite hasta alcanzar la altura máxima “HT” (h/cm).
- El tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo “SET” (h).
- La superficie de la bandeja que sirve de base “MA” (cm^2).

El tiempo de producción de cada estructura “j” será la suma del tiempo de preparación de la máquina en cada trabajo (SET) más el tiempo de cada capa de polvo (HT) por el número de capas más el tiempo empleado en cada unidad de volumen de material (VT) por el volumen de todas las geometrías de la estructura.

En función de la selección de las geometrías que irían en cada estructura, podrían dar distintos tiempos de procesado y por tanto el valor de la fecha de finalización de todo el proceso (“*makespan*”) podría cambiar. Es por ello, que se usa en este problema como objetivo, encontrar la solución de mínimo *makespan*.

Se va a exponer el modelado del problema existente en la literatura propuesto por Kucukkoc (2019).

Modelado del problema (Kucukkoc, 2019)

Sets

G: Tipos de geometrías (partes)

B: Estructuras (trabajos)

Índices

$i = 1, \dots, n_g$ (Geometrías)

$j = 1, \dots, n_b$ (Estructuras)

Parámetros

V_i : Volumen de la geometría i

A_i : Área de la base de la geometría i

H_i : Altura de la geometría i

VT: Tiempo que se emplea por unidad de volumen del material

HT: Tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura

SET: Tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo

MA: Área máxima de la base de cualquier estructura

Variables de decisión

X_{ij} : =1, si la geometría i se fabrica en la estructura j -ésima

Variables auxiliares

Z_j : =1, si alguna parte es asignada a la estructura j -ésima (es decir, si $\sum_i X_{ij} \geq 1$)

- PT_j: Tiempo de producción de la estructura j-ésima
 C_j: Tiempo de finalización de la estructura j-ésima
 C_{max}: Tiempo de finalización de la última estructura (makespan)

Modelo

$$\text{Minimizar } C_{\max} = \max_j(C_j)$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{n_b} X_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n_g \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} A_i \cdot X_{ij} \leq MA \quad \forall j = 1, \dots, n_b \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} X_{i,j+1} \leq n_g \cdot \sum_{i=1}^{n_g} X_{ij} \quad \forall j = 1, \dots, n_b - 1 \quad (3)$$

$$PT_1 \leq C_1; C_{j-1} + PT_j \leq C_j \quad \forall j = 2, \dots, n_b \quad (4)$$

$$PT_j = SET \cdot Z_j + VT \cdot \sum_{i=1}^{n_g} V_i \cdot X_{ij} + HT \cdot \max_i(H_i \cdot X_{ij}) \quad \forall j = 1, \dots, n_b \quad (5)$$

$$Z_j = 1, \quad SI \sum_{i=1}^{n_g} X_{ij} \geq 1 \cdot \quad \forall j = 1, \dots, n_b \quad (6)$$

La función objetivo minimiza el tiempo de finalización del último trabajo. La restricción (1) reparte las unidades demandadas de cada geometría entre las estructuras. La restricción (2) limita el espacio de la superficie de la base. La restricción (3) obliga a que, si una estructura j no se realiza, entonces las siguientes tampoco (orden incremental de trabajos). La restricción (4) indica que el tiempo de finalización de un trabajo será posterior a la finalización del anterior más el tiempo de producción del trabajo. En la restricción (5) se calculan los tiempos de procesado de cada trabajo. En la restricción (6) se indican que si $\sum_i X_{ij} \geq 1$, entonces $Z_j=1$, es decir, si una estructura no se usa, no se le asignan partes.

Este modelo matemático se observa que es no lineal por el uso de las expresiones MAX en la función objetivo y en las restricciones (5), además de las restricciones (6). En el siguiente capítulo se planteará la linealización del mismo.

2.4.2. Problema M/M/iM: "Nesting and Scheduling problem with identical parallel AM machines".

Introducción al problema

La programación de trabajos cuando existen varias máquinas de fabricación aditiva idénticas (*identical AM machines*) y se pueden agrupar las partes en trabajos o estructuras diferentes entre sí, consiste en asignar cada una de las " n_g " partes a fabricar a un trabajo, y cada trabajo a una de las máquinas disponibles, fijando el orden de paso de cada trabajo asignado a cada máquina.

Todas las máquinas tienen las mismas características (volumen, área o alturas máximas, tiempos de preparación o velocidades de producción). Además, se considera que cualquier parte se puede fabricar en cualquiera de las máquinas.

Definición del problema

Existe un conjunto de n_g geometrías o partes individuales a fabricar en un conjunto de n_m máquinas AM idénticas mediante un proceso basado en capas de polvo ("*Powder Bed Fusion*"). Las partes se pueden agrupar formando un conjunto de n_b estructuras o trabajos (el valor de n_b se fija como un máximo a priori) de forma que hay que fijar el orden de paso de cada trabajo a su paso por la máquina asignada.

De cada una de las n_g Geometrías "i" que hay que fabricar se conoce:

- El volumen que ocupa la geometría " V_i " (cm^3).
- La sección o área que ocupa la geometría " A_i " (cm^2).
- La altura de la geometría " H_i " (cm).

Además, se conoce información del proceso en las máquinas y que coinciden para todas ellas. La máquina AM se basa en la impresión 3D por capas de polvo sucesivas sobre una bandeja inicial, de forma que la altura de la pieza más alta es la que marca el tiempo de producción del trabajo o estructura:

- El tiempo que se emplea por unidad de volumen del material " VT " (h/cm^3).
- El tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura y que se repite hasta alcanzar la altura máxima " HT " (h/cm).
- El tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo " SET " (h).
- La superficie de la bandeja que sirve de base " MA " (cm^2).

El tiempo de producción de cada estructura "j" será la suma del tiempo de preparación de la máquina en cada trabajo (SET) más el tiempo de cada capa de polvo (HT) por el número de capas más el tiempo empleado en cada unidad de volumen de material (VT) por el volumen de todas las geometrías de la estructura.

En función de la selección de las geometrías que irían en cada estructura, podrían dar distintos tiempos de procesado y por tanto el valor de la fecha de finalización de todo el proceso ("*makespan*") podría cambiar. Es por ello, que se usa en este problema como objetivo, encontrar la solución de mínimo *makespan*.

Se va a exponer el modelado del problema existente en la literatura propuesto por Kucukkoc (2019).

Modelado del problema (Kucukkoc, 2019)

Sets

G: Tipos de geometrías (partes)

B: Estructuras (trabajos)

M: AM Máquinas (máquinas)

Índices

$i = 1, \dots, n_g$ (Geometrías)

$j = 1, \dots, n_b$ (Estructuras)

$m = 1, \dots, n_m$ (AM Máquinas)

Parámetros

- V_i : Volumen de la geometría i
 A_i : Área de la base de la geometría i
 H_i : Altura de la geometría i
 VT : Tiempo que se emplea por unidad de volumen del material
 HT : Tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura
 SET : Tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo
 MA : Área máxima de la base de cualquier estructura

Variables de decisión

- X_{ijm} : =1, si la geometría i se fabrica en la estructura j -ésima de la máquina m

Variables auxiliares

- Z_{jm} : =1, si alguna parte es asignada a la estructura j -ésima de la máquina m (si $\sum_i X_{ijm} \geq 1$)
 PT_{jm} : Tiempo de producción de la estructura j -ésima en la máquina m
 C_{jm} : Tiempo de finalización de la estructura j -ésima en la máquina m
 C_{max} : Tiempo de finalización de la última estructura (makespan)

Modelo

$$\text{Minimizar } C_{max} = \max_{j,m}(C_{jm})$$

sujeto a:

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

$$\sum_{i=1}^{n_g} A_i \cdot X_{ijm} \leq MA \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} X_{i,j+1,m} \leq n_g \cdot \sum_{i=1}^{n_g} X_{ijm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b - 1; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (3)$$

$$PT_{1m} \leq C_{1m} \quad \forall m = 1, \dots, n_m \quad (4a)$$

$$C_{j-1,m} + PT_{jm} \leq C_{jm} \quad \forall j = 2, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (4b)$$

$$PT_{jm} = SET \cdot Z_{jm} + VT \cdot \sum_{i=1}^{n_g} V_i \cdot X_{ijm} + HT \cdot \max_i(H_i \cdot X_{ijm}) \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (5)$$

$$Z_{jm} = 1, \quad SI \sum_{i=1}^{n_g} X_{ijm} \geq 1 \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (6)$$

La función objetivo minimiza el tiempo de finalización del último trabajo (*makespan*). La restricción (1) asigna cada geometría a una única estructura en una única máquina. La restricción (2) limita el espacio de

la superficie de cada estructura en cada máquina. La restricción (3) obliga a que, si una estructura no se realiza en una máquina, entonces las siguientes tampoco (orden incremental de trabajos en cada máquina). Las restricciones (4a y 4b) indican que en cada máquina el tiempo de finalización de un trabajo será posterior a la finalización del anterior más el tiempo de producción del trabajo. En la restricción (5) se calculan los tiempos de procesado de cada trabajo en cada máquina. En la restricción (6) se indican que si $\sum_i X_{ijm} \geq 1$, entonces $Z_{jm}=1$, es decir, si una estructura no se usa en una máquina, no se le asignan partes.

Este modelo matemático se observa que es no lineal por el uso de las expresiones MAX en la función objetivo y en las restricciones (5), además de las restricciones (6). En el siguiente capítulo se planteará la linealización del mismo.

2.4.3. Problema M/M/nM: “Nesting and Scheduling problem with non-identical parallel machines”.

Introducción al problema

La programación de trabajos cuando existen varias máquinas de fabricación aditiva no idénticas (*non-identical AM machines*) y se pueden agrupar las partes en trabajos o estructuras diferentes entre sí, consiste en asignar cada una de las “ n_g ” partes a fabricar a un trabajo, y cada trabajo a una de las máquinas disponibles, fijando el orden de paso de cada trabajo asignado a cada máquina.

Cada una de las máquinas puede tener características diferentes al resto (volumen, área o alturas máximas, tiempos de preparación o velocidades de producción). Además, podría ocurrir que alguna parte no se puede fabricar en algunas de las máquinas.

Definición del problema

Existe un conjunto de n_g geometrías o partes individuales a fabricar en un conjunto de n_m máquinas AM no idénticas mediante un proceso basado en capas de polvo (“*Powder Bed Fusion*”). Las partes se pueden agrupar formando un conjunto de n_b estructuras o trabajos (el valor de n_b se fija como un máximo a priori) de forma que hay que fijar el orden de paso de cada trabajo a su paso por la máquina asignada.

De cada una de las n_g geometrías “ i ” que hay que fabricar se conoce:

- El volumen que ocupa la geometría “ V_i ” (cm^3)
- La sección o área que ocupa la geometría “ A_i ” (cm^2)
- La altura de la geometría “ H_i ” (cm)

Además, se conoce información del proceso en las máquinas y que puede ser diferente para cada una de ellas. La máquina AM se basa en la impresión 3D por capas de polvo sucesivas (“*Powder Bed Fusion*”) sobre una bandeja inicial, de forma que la altura de la pieza más alta es la que marca el tiempo de producción del trabajo o estructura. Se considera que cada máquina tiene una altura máxima de producción, de forma que pudieran existir partes que no se puedan fabricar en algunas máquinas por este motivo. En cualquier caso, todas las partes se tienen que poder fabricar en al menos una de las máquinas. Las características de cada máquina AM “ m ” son:

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

El tiempo de producción de cada estructura “j” en la Máquina “m” será la suma del tiempo de preparación de la máquina en cada trabajo (SET_m) más el tiempo de cada capa de polvo (HT_m) por el número de capas más el tiempo empleado en cada unidad de volumen de material (VT_m) por el volumen de todas las geometrías de la estructura.

En función de la selección de las geometrías que irían en cada estructura, podrían dar distintos tiempos de procesado y por tanto el valor de la fecha de finalización de todo el proceso (“*makespan*”) podría cambiar. Es por ello, que se usa en este problema como objetivo, encontrar la solución de mínimo *makespan*.

Se va a exponer el modelado del problema existente en la literatura propuesto por Kucukkoc (2019).

Modelado del problema (Kucukkoc, 2019)

Sets

G: Tipos de geometrías (partes)

B: Estructuras (trabajos)

M: AM Máquinas (máquinas)

Índices

$i = 1, \dots, n_g$ (Geometrías)

$j = 1, \dots, n_b$ (Estructuras)

$m = 1, \dots, n_m$ (AM Máquinas)

Parámetros

V_i : Volumen de la geometría i

A_i : Área de la base de la geometría i

H_i : Altura de la geometría i

VT_m : Tiempo que se emplea por unidad de volumen del material en máquina m

HT_m : Tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura en máquina m

SET_m : Tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo en máquina m

MA_m : Área máxima de la base de cualquier estructura en máquina m

MH_m : Altura máxima que se puede procesar en máquina m

Variables de decisión

X_{ijm} : =1, si la geometría i se fabrica en la estructura j -ésima de la máquina m

Variables auxiliares

Z_{jm} : =1, si alguna parte es asignada a la estructura j -ésima de la máquina m (si $\sum_i X_{ijm} \geq 1$)

PT_{jm} : Tiempo de producción de la estructura j -ésima en la máquina m

C_{jm} : Tiempo de finalización de la estructura j -ésima en la máquina m

C_{max} : Tiempo de finalización de la última estructura (*makespan*)

Modelo

$$\text{Minimizar } C_{\max} = \max_{j,m}(C_{jm})$$

sujeto a:

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

$$\sum_{i=1}^{n_g} A_i \cdot X_{ijm} \leq MA_m \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} X_{i,j+1,m} \leq n_g \cdot \sum_{i=1}^{n_g} X_{ijm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b - 1; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (3)$$

$$PT_{1m} \leq C_{1m} \quad \forall m = 1, \dots, n_m \quad (4a)$$

$$C_{j-1,m} + PT_{jm} \leq C_{jm} \quad \forall j = 2, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (4b)$$

$$PT_{jm} = SET_m \cdot Z_{jm} + VT_m \cdot \sum_{i=1}^{n_g} V_i \cdot X_{ijm} + HT_m \cdot \max_i (H_i \cdot X_{ijm}) \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (5)$$

$$Z_{jm} = 1, \quad SI \sum_{i=1}^{n_g} X_{ijm} \geq 1 \cdot \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (6)$$

$$H_i \cdot X_{ijm} \leq MH_m \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (7)$$

La función objetivo minimiza el tiempo de finalización del último trabajo y también en segunda opción todas las variables de máximas alturas. La restricción (1) asigna cada geometría a una única estructura en una única máquina. La restricción (2) limita el espacio de la superficie de cada estructura en cada máquina. La restricción (3) obliga a que, si una estructura no se realiza en una máquina, entonces las siguientes tampoco (orden incremental de trabajos en cada máquina). Las restricciones (4a y 4b) indican que en cada máquina el tiempo de finalización de un trabajo será posterior a la finalización del anterior más el tiempo de producción del trabajo. En la restricción (5) se calculan los tiempos de procesado de cada trabajo en cada máquina. En las restricción (6) se indica que si $\sum_i X_{ijm} \geq 1$, entonces $Z_{jm}=1$, es decir, si una estructura no se usa en una máquina, no se le asignan partes. En la restricción (7) se limita la altura de los trabajos asignados a cada máquina.

Este modelo matemático se observa que es no lineal por el uso de las expresiones MAX en la función objetivo y en las restricciones (5), además de las restricciones (6). En el siguiente capítulo se planteará la linealización del mismo.

3 MODELADO DE LOS PROBLEMAS

En este capítulo se llevará a cabo las nuevas aportaciones a los problemas antes expuestos de la literatura y modelados por Kucukkoc (2019). En las nuevas aportaciones, se tiene en primer lugar la linealización de los 3 problemas anteriores como nuevos modelos de programación lineal. En segundo lugar, para dichos problemas se ha considerado la posibilidad de colocar las partes en orientaciones alternativas, dando pues mayores posibilidades de programación. Esta característica se ha modelado para el problema más complejo que es con máquinas no-idénticas.

3.1. Modelos lineales de los problemas de una orientación

En primer lugar, se modelan de forma lineal los 3 problemas de Kucukkoc (2019) planteados en el capítulo anterior. Estos problemas sólo permiten una orientación de cada parte cuando se asigna a una estructura de una máquina.

3.1.1 Problema M/M/S minimizando el makespan (1 Orientación).

Para convertir el modelo de Kucukkoc (2019) para el problema M/M/S en un modelo lineal, hay que linealizar la función objetivo y las restricciones (5) y (6):

Variables auxiliares adicionales

H_{max_j} : Máxima altura de cualquier parte de la estructura j

Restricciones adicionales

$$C_j \leq C_{max} \quad \forall j = 1, \dots, n_b \quad (7)$$

$$H_i \cdot X_{ij} \leq H_{max_j} \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b \quad (8)$$

Restricciones a sustituir

$$PT_j = SET \cdot Z_j + VT \cdot \sum_{i=1}^{n_g} V_i \cdot X_{ij} + HT \cdot H_{max_j} \quad \forall j = 1, \dots, n_b \quad (5')$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijk} \leq n_g \cdot Z_j \quad \forall j = 1, \dots, n_b \quad (6')$$

Las restricciones (5') sustituyen a las restricciones (5) anteriores, y las restricciones (6') sustituyen a las restricciones (6) anteriores.

Nueva función objetivo

$$\text{Minimizar } C_{\max} + \epsilon \cdot \sum_{j=1}^{n_b} H_{\max_j}$$

Siendo ϵ un valor muy pequeño. Con esta función objetivo y las restricciones (8) se obliga a que los valores de H_{\max_j} alcancen justo el máximo de cada estructura en el óptimo; de forma similar, el *makespan* se calcula entre las restricciones (7) y la función objetivo.

El nuevo modelo es un modelo de programación lineal mixta-entera.

3.1.2 Problema M/M/iM minimizando el makespan (1 Orientación).

Para convertir el modelo de Kukkuoc (2019) para el problema M/M/iM en un modelo lineal, hay que linealizar la función objetivo y las restricciones (5) y (6):

Variables auxiliares adicionales

$H_{\max_{jm}}$: Máxima altura de cualquier parte de la estructura j en la máquina m

Restricciones adicionales

$$C_{jm} \leq C_{\max} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (7)$$

$$H_i \cdot X_{ijm} \leq H_{\max_{jm}} \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (8)$$

Restricciones a sustituir

$$PT_{jm} = SET \cdot Z_{jm} + VT \cdot \sum_{i=1}^{n_g} V_i \cdot X_{ijm} + HT \cdot H_{\max_{jm}} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (5')$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} X_{ijm} \leq n_g \cdot Z_{jm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (6')$$

Las restricciones (5') sustituyen a las restricciones (5) anteriores, y las restricciones (6') sustituyen a las restricciones (6) anteriores.

Nueva función objetivo

$$\text{Minimizar } C_{\max} + \epsilon \cdot \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} H_{\max_{jm}}$$

Siendo ϵ un valor muy pequeño. Con esta función objetivo y las restricciones (8) se obliga a que los valores de $H_{\max_{jm}}$ alcancen justo el máximo de cada estructura en el óptimo; de forma similar, el *makespan* se calcula entre las restricciones (7) y la función objetivo.

El nuevo modelo es un modelo de programación lineal mixta-entera.

3.1.3 Problema M/M/nM minimizando el makespan (1 Orientación).

Para convertir el modelo de Kucukkoc (2019) para el problema M/M/nM en un modelo lineal, hay que linealizar la función objetivo y las restricciones (5) y (6):

Variables auxiliares adicionales

$H_{max_{jm}}$: Máxima altura de cualquier parte de la estructura j en la máquina m

Restricciones adicionales

$$C_{jm} \leq C_{max} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (8)$$

Restricciones a sustituir

$$PT_{jm} = SET_m \cdot Z_{jm} + VT_m \cdot \sum_{i=1}^{n_g} V_i \cdot X_{ijm} + HT_m \cdot H_{max_{jm}} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (5')$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} X_{ijm} \leq n_g \cdot Z_{jm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (6')$$

$$H_i \cdot X_{ijm} \leq H_{max_{jm}} \quad \forall i = 1, \dots, n_g; \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (7')$$

$$H_{max_{jm}} \leq MH_m \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (7'')$$

Las restricciones (5') sustituyen a las restricciones (5) anteriores, las restricciones (6') sustituyen a las restricciones (6) anteriores, y las restricciones (7') y (7'') sustituyen a las restricciones (7) anteriores.

Nueva función objetivo

$$\text{Minimizar } C_{max} + \epsilon \cdot \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} H_{max_{jm}}$$

Siendo ϵ un valor muy pequeño. Con esta función objetivo y las restricciones (7') se obliga a que los valores de $H_{max_{jm}}$ alcancen justo el máximo de cada estructura en el óptimo; de forma similar, el *makespan* se calcula entre las restricciones (8) y la función objetivo.

El nuevo modelo es un modelo de programación lineal mixta-entera.

3.2. Múltiples orientaciones en Fabricación Aditiva

En la fabricación aditiva, las partes se van fabricando capa a capa apoyadas en una bandeja, por lo que el modelo 3D hay que orientarlo en una dirección para definir cómo se fabricará capa a capa. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de 4 posibles orientaciones de una misma parte.

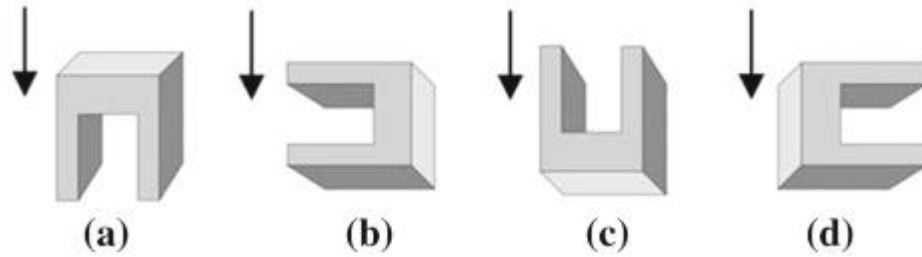


Figura 3-1. Distintas orientaciones de una sola pieza.

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

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

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

En resumen, los problemas M/M/nM anteriormente planteados se van a extender a más de 1 orientación. De forma que en primer lugar se modelarán de forma lineal extendiendo los modelos anteriores, y después se resolverán teniendo en cuenta 3 posibles orientaciones para una misma pieza. Inicialmente se resolverán para una única orientación, seguidamente se resolverá el mismo problema para 2 y 3 orientaciones, al añadir más opciones para colocar las piezas en la bandeja se espera una disminución del tiempo máximo de terminación de los trabajos, ya que cada pieza se orientará de la forma más conveniente.

El modelado lineal se realizará en este capítulo mientras que la resolución se realizará en los siguientes capítulos.

3.3. Modelado del problema M/M/nM con múltiples orientaciones.

Al añadir una nueva orientación, el modelo lineal anteriormente planteado se verá levemente modificado. A continuación, se muestra el modelo genérico.

Sets

G: Partes o geometrías

B: Trabajos o estructuras

M: Máquinas de fabricación aditiva (AM)

K: Orientaciones prácticas de cada parte

Índices

$i = 1, \dots, n_g$ (Partes)

$j = 1, \dots, n_b$ (Trabajos)

$m = 1, \dots, n_m$ (Máquinas)

$k = 1, \dots, n_o(i)$ (Orientaciones prácticas de la Parte i)

Parámetros

V_i : Volumen de la parte i

A_{ik} : Área proyectada sobre la bandeja de la parte i con orientación k

H_{ik} : Altura de la parte i con orientación k

VT_m : Tiempo que se emplea por unidad de volumen del material en máquina m

HT_m : Tiempo que se emplea para cada capa de polvo por unidad de altura en máquina m

SET_m : Tiempo de preparación de la máquina cada vez que se haga un trabajo en máquina m

MA_m : Área máxima de la bandeja de cualquier estructura en máquina m

MH_m : Altura máxima que se puede procesar en máquina m

VARIABLES DE DECISIÓN

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

VARIABLES AUXILIARES

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

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

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

C_{max} : Tiempo de finalización del último trabajo (*makespan*)

$H_{max,j}$: Máxima altura de cualquier parte del trabajo j

Modelo

$$\text{Minimizar } \left\{ C_{max} + \varepsilon \cdot \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} H_{max,jm} \right\}$$

sujeto a:

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

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

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

$$PT_{1m} \leq C_{1m} \quad \forall m = 1, \dots, n_m \quad (4a)$$

$$C_{j-1,m} + PT_{jm} \leq C_{jm} \quad \forall j = 2, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (4b)$$

$$PT_{jm} = SET_m \cdot Z_{jm} + VT_m \cdot \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} V_i \cdot X_{ijmk} + HT_m \cdot H_{max,jm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} \sum_{k=1}^{n_o(i)} X_{ijmk} \leq n_g \cdot Z_{jm} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (6)$$

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

$$H_{\max_{jm}} \leq M H_m \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (7b)$$

$$C_{jm} \leq C_{\max} \quad \forall j = 1, \dots, n_b; \forall m = 1, \dots, n_m \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n_b} \sum_{m=1}^{n_m} Z_{jm} \leq n_b \quad (9)$$

El modelo está basado en el modelo anterior con una orientación con los siguientes cambios:

1. Se introduce un nuevo SET asociado a las orientaciones de cada parte, con la información necesaria de alturas y superficies de cada parte en cada orientación.
2. También se añade un índice a las variables de decisión X asociado a la orientación a seleccionar.
3. Se adaptan todas las restricciones (1) a (8) del modelo lineal para introducir las orientaciones.
4. Se añaden las restricciones (9) para limitar el número total de trabajos a realizar entre todas las máquinas.

4 MODELADO EN LINGO

En este capítulo se llevará a cabo la resolución de los problemas empleando LINGO. Inicialmente, se explica la estructura que siguen los modelos. Posteriormente, se plasman los diferentes modelos planteados en LINGO y se explican sus características más relevantes.

4.1. Introducción a LINGO

LINGO es una herramienta integral diseñada para la resolución de modelos de optimización matemática. El programa proporciona un lenguaje para expresar los modelos, un entorno con todas las funciones para crear y editar problemas, y un conjunto de programas integrados rápidos capaces de resolver de manera eficiente la mayoría de los modelos de optimización. LINGO permite crear modelos que extraen información directamente de archivos de texto, bases de datos u hojas de cálculo. De manera similar, LINGO puede generar información de la solución directamente en una base de datos u hoja de cálculo.

Los modelos resueltos a continuación presentan la misma estructura, a continuación, se define la estructura básica de un modelo en LINGO, si durante la resolución de los modelos apareciesen conceptos no explicados en este punto, se explicarán al pie del modelo. Un modelo en LINGO consta de las siguientes secciones, además de la función objetivo y restricciones propias de cada modelo:

- **Sección SET:** Se definen los elementos de conjuntos, sus datos y las variables asociadas a conjuntos. Existen dos tipos de conjuntos, primitivos y derivados, los conjuntos primitivos recogen los conjuntos de elementos del problema y sus atributos propios o compartidos con elementos que no estén en un conjunto, los derivados se forman por la combinación de conjuntos primitivos. Recogen los datos y/o variables compartidas entre elementos de conjuntos primitivos.
- **Sección DATA:** Se definen los valores de los datos asociados a conjuntos, así como cualquier dato sin subíndices (no asociado a conjuntos).
- **Sección CALC:** Sección que ofrece LINGO para la creación de datos calculados, si no vienen ya calculados externamente. De igual forma pueden recalcularse en esta sección valores para atributos que ya tenían información.

4.2. Modelos en LINGO para 1 orientación

A continuación, se exponen los diferentes modelos para una única orientación traducidos al lenguaje de LINGO. Se explicarán las diferentes secciones de cada problema y las variaciones realizadas para adaptar el modelo inicial con una sola máquina a aquellos con varias máquinas.

4.2.1. Modelo M/M/S 1 orientación

En primer lugar, definimos los conjuntos y los elementos asociados a ellos, además de los datos asociados a conjuntos (o no) y variables que intervendrán en el problema. Para ello, como se explicó anteriormente emplearemos la sección SET y la sección DATA.

```

MODEL:

DATA:
Ng=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','ng');
Nb=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','nb');
ENDDATA

SETS:
Geometrias/1..ng/:V,A,H;
Estructuras/1..nb/:Z,PT,C,Hmax;
GE(Geometrias,Estructuras):X;
ENDSETS

DATA:
H=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','H');
A=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','A');
V=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','V');
HT=0.7;
SET=1.2;
MA=625;
Epsilon=0.0001;

```

Figura 4-1. SETS Y DATA M/M/S 1O.

La función @OLE sirve para leer los valores de los diferentes datos de una hoja de cálculo. En este primer problema, intervienen dos conjuntos primitivos (Geometrías, Estructuras) y un conjunto derivado (GE), cada uno con sus respectivas variables asociadas. En la siguiente sección DATA, se establecen los valores que tomarán los datos asociados a conjuntos y aquellos datos que serán constantes en el modelo. Por último, antes de terminar la sección DATA se añade un trozo de código para guardar los resultados de cada problema en un fichero de texto mediante la función @TEXT.

```

@TEXT('AMO_P1_lo.txt')= @write( ' Problema M/M/S de Additive Manufacturing con 1 orientacion', @newline(1),20*'-',@newline(1));
@TEXT('AMO_P1_lo.txt')= @write( ' Número de partes: ',Ng,' <> Número de trabajos: ',Nb,' <> Número de maquinas: 1 <> Número de orientaciones: 1',@newline(1));
@TEXT('AMO_P1_lo.txt')= @write( ' Makespan: ',@FORMAT(CMAX,'8.2f'), @newline(1));
@TEXT('AMO_P1_lo.txt')= @write( ' CPU Time (sec.): ', @FORMAT(@TIME(),'8.2f'),@newline(2));
@TEXT('AMO_P1_lo.txt')= @writefor (Estructuras(j): ' Estructura ', j , ': Partes: ',
@writefor(Geometrias(i)|X(i,j) #GT# 0.5: i, '/' ), '<>',
@newline(1),
' Proc. Time: ', @FORMAT(PT(j),'8.2f'),' <>',
' Complet. Time: ', @FORMAT(C(j),'8.2f'),' <>',
@newline(1),
@newline(2)
);
ENDDATA

```

Figura 4-2. Exportación de los resultados a fichero de texto.

Seguidamente, en la sección CALC se define el valor de VT, el único dato que no viene calculado externamente y cuyo valor es constante. Por último, se definen la función objetivo, las restricciones del modelo y las restricciones de tipo de variables. Es necesario definir estas últimas, ya que LINGO entiende toda variable que no se especifique en este apartado como continua, por lo que hay que definir aquellas variables binarias (@BIN), enteras (@GIN) o libres (@FREE), en caso de que las haya, en esta última parte del modelo.

```

CALC:
VT=1/32.4;
ENDCALC

MIN=Cmax+(Epsilon*@SUM(Estructuras(j):Hmax(j))); !FUNCION OBJETIVO;
!MIN=Cmax; !FUNCION OBJETIVO;

@FOR(Geometrias(i):@SUM(Estructuras(j):X(i,j))=1);
@FOR(Estructuras(j):@SUM(Geometrias(i):A(i)*X(i,j))<=MA);
@FOR(Estructuras(j)|j#LE#(Nb-1):@SUM(Geometrias(i):X(i,j+1))<=(Ng*@SUM(Geometrias(i):X(i,j))));
@FOR(Estructuras(j):PT(1)<=C(1)); !Restriccion 4a;
@FOR(Estructuras(j)|j#GE#2:C(j-1)+PT(j)<=C(j)); !Restriccion 4b;
@FOR(Estructuras(j):PT(j)=(SET*Z(j))+VT*@SUM(Geometrias(i):V(i)*X(i,j)))+(HT*Hmax(j));
@FOR(Estructuras(j):@SUM(Geometrias(i):X(i,j))<=Ng*Z(j));
@FOR(Estructuras(j):C(j)<=Cmax);
@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):H(i)*X(i,j)<=Hmax(j)));

!RESTRICCIONES DE TIPO DE VARIABLES;
@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):@BIN(X(i,j))));
@FOR(Estructuras(j):@BIN(Z(j)));

END

```

Figura 4-3. Función objetivo y restricciones M/M/S 1O.

Para las operaciones condicionales con índices (i, j) será necesario emplear una notación especial. Por ejemplo, para especificar que el índice j debe ser mayor o igual que 2 en la restricción 4b, se emplea la notación “ $j\#GE\#2$ ”, donde GE significa “*Greater Equal*”.

4.2.2. Modelo M/M/iM 1 orientación

La principal diferencia respecto al modelo para una sola máquina se hace visible en esta primera parte del modelo. En primer lugar, será necesario leer el número de máquinas de una hoja de cálculo, además de añadir un nuevo conjunto primitivo para las máquinas idénticas con sus respectivos parámetros asociados (HT, SET y MA). Al añadir un nuevo índice para las máquinas, aquellas variables que pertenecían al conjunto primitivo “Estructuras” en el anterior modelo, pasarán a formar parte del nuevo conjunto derivado “EM” (Estructuras, Máquinas). Por ejemplo, para referirnos al tiempo de proceso (PT) será necesario especificar de que máquina estamos hablando, de ahí la importancia de este nuevo conjunto. Además, añadiremos el nuevo índice al anterior conjunto “GE”, obteniendo como consecuencia el nuevo conjunto “GEM” (Geometrías, Estructuras, Máquinas).

La segunda sección DATA es igual que la del modelo anterior, con la única diferencia de que a partir de ahora leeremos todos los valores de una hoja de cálculo. También se exportan los resultados a un archivo de texto, al igual que en el modelo anterior.

```

MODEL:

DATA:
Ng=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','ng');
Nb=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','nb');
Nm=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','nm');
ENDDATA

SETS:
Geometrias/1..ng/:V,A,H;
Estructuras/1..nb/;
Maquinas/1..nm/:HT,SET,MA;
EM(Estructuras,Maquinas):Z,PT,C,Hmax;
GEM(Geometrias,Estructuras,Maquinas):X;
ENDSETS

DATA:
H=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','H');
A=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','A');
V=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','V');
HT=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','HT');
SET=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','SET');
MA=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P15.xlsx','MA');
Epsilon=0.0001;

```

Figura 4-4. SETS Y DATA M/M/iM 1O.

En cuanto a las restricciones, se adaptará el modelo anterior con el nuevo índice (m: máquinas), pero las restricciones son las mismas para ambos modelos.

```

CALC:
VT=1/32.4;
ENDCALC

MIN=Cmax+(Epsilon*@SUM(Estructuras(j):@SUM(Maquinas(m):Hmax(j,m)))); !FUNCION OBJETIVO;

@FOR(Geometrias(i):@SUM(Estructuras(j):@SUM(Maquinas(m):X(i,j,m))=1);
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@SUM(Geometrias(i):A(i)*X(i,j,m))<=MA(m));
@FOR(Estructuras(j)|j#LE#nb-1:@FOR(Maquinas(m):@SUM(Geometrias(i):X(i,j+1,m))<=ng*@SUM(Geometrias(i):X(i,j,m)));
@FOR(Maquinas(m):PT(l,m)<=C(l,m));
@FOR(Estructuras(j)|j#GE#2:@FOR(Maquinas(m):C(j-1,m)+PT(j,m)<=C(j,m));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):PT(j,m)=(SET(m)*Z(j,m))+(VT*@SUM(Geometrias(i):V(i)*X(i,j,m)))+(HT(m)*Hmax(j,m)));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@SUM(Geometrias(i):X(i,j,m))<=ng*Z(j,m));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):C(j,m)<=Cmax));
@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):H(i)*X(i,j,m)<=Hmax(j,m)));

!RESTRICCIONES DE TIPO DE VARIABLES;

@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@BIN(X(i,j,m))));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@BIN(Z(j,m))));

END

```

Figura 4-5. Función objetivo y restricciones M/M/iM 1O.

4.2.3. Modelo M/M/nM 1 orientación

Aunque hay varias máquinas, a diferencia del modelo anterior, las máquinas no son idénticas en este caso. Es decir, parámetros como el tiempo que se emplea por unidad de volumen o el tiempo de preparación de la máquina, serán diferentes en todas las máquinas.

Al no ser todas las máquinas iguales, es necesario añadir un nuevo parámetro: La altura máxima de una pieza que se puede procesar en cada máquina (MH). Es la única diferencia respecto al anterior modelo.


```

MODEL:

DATA:
Ng=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','ng');
Nb=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','nb');
Nm=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','nm');
ENDDATA

SETS:
Geometrias/1..ng/:V,A,H;
Estructuras/1..nb/;
Maquinas/1..nm/:HT,SET,MA,MH;
EM(Estructuras, Maquinas):Z,PT,C,Hmax;
GEM(Geometrias, Estructuras, Maquinas):X;
ENDSETS

DATA:
H=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','H');
A=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','A');
V=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','V');
HT=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','HT');
SET=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','SET');
MA=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','MA');
MH=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P39.xlsx','MH');
Epsilon=0.0001;

```

Figura 4-6. SETS y DATA M/M/nM 1O.

Al añadir un nuevo parámetro, será necesario añadir una restricción con el objetivo de que la estructura con la mayor altura procesada en cualquier máquina sea menor que la altura máxima que puede procesar la máquina.

```

CALC:
VT=1/32.4;
ENDCALC

MIN=Cmax+(Epsilon*@SUM(Estructuras(j):@SUM(Maquinas(m):Hmax(j,m)))); !FUNCION OBJETIVO;

@FOR(Geometrias(i):@SUM(Estructuras(j):@SUM(Maquinas(m):X(i,j,m)))=1);
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@SUM(Geometrias(i):A(i)*X(i,j,m))<=MA(m)));
@FOR(Estructuras(j)|j#LE#nb-1:@FOR(Maquinas(m):@SUM(Geometrias(i):X(i,j+1,m))<=ng*@SUM(Geometrias(i):X(i,j,m))));
@FOR(Maquinas(m):PT(1,m)<=C(1,m));
@FOR(Estructuras(j)|j#GE#2:@FOR(Maquinas(m):C(j-1,m)+PT(j,m)<=C(j,m)));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):PT(j,m)=(SET(m)*Z(j,m))+VT*@SUM(Geometrias(i):V(i)*X(i,j,m)))+(HT(m)*Hmax(j,m)));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@SUM(Geometrias(i):X(i,j,m))<=ng*Z(j,m)));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):C(j,m)<=Cmax));
@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):H(i)*X(i,j,m)<=Hmax(j,m))));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):Hmax(j,m)<=MH(m)));

!RESTRICCIONES DE TIPO DE VARIABLES;

@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@BIN(X(i,j,m))));
@FOR(Estructuras(j):@FOR(Maquinas(m):@BIN(Z(j,m))));

END

```

Figura 4-7. Función objetivo y restricciones M/M/nM 1O.

4.3. Modelos en LINGO para 2 y 3 orientaciones

Para adaptar los anteriores modelos hay que incluir un nuevo conjunto primitivo en los SETS, al que nombraremos “Orientación”. Habrá que modificar los anteriores conjuntos derivados teniendo en cuenta este nuevo conjunto, ya que parámetros como la altura de una pieza ahora dependerán de la orientación que tenga.

```

MODEL:

DATA:
Ng=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','ng');
Nb=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','nb');
ENDDATA

SETS:
Geometrias/1..ng/:V;
Estructuras/1..nb/:Z,PT,C,Hmax;
Orientacion/1..2/;
GO(Geometrias,Orientacion)/@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx',pairs)/:A,H;
GEO(Geometrias,Estructuras,Orientacion):X;
ENDSETS

DATA:
H=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','HIKD');
A=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','AIKD');
V=@OLE('C:\Users\ferpo\OneDrive\Escritorio\TFG FPB\Datos modelos\COR_AM3DPD\P1.xlsx','V');
HT=0.7;
SET=1.2;
MA=625;
Epsilon=0.0001;

```

Figura 4-8. SETS y DATA M/M/S 2O.

Para los modelos con 3 orientaciones, el único cambio a realizar en LINGO será cambiar el límite superior del conjunto “Orientación” de 2 a 3. Además, deberemos leer los valores de altura y superficie que se correspondan obtenidos en la hoja de cálculo (Sustituir HIKD por HIKT y AIKD por AIKT), donde HIKT y AIKT son los valores de la altura y superficie para 3 orientaciones.

En la figura X, se plasman los cambios realizados en el modelo, añadiendo el índice k (Orientación) a aquellos parámetros y variables que ahora dependen de la orientación de la pieza, pero la función objetivo y las restricciones no varían respecto al M/M/S para una única orientación, ni para los otros dos modelos.

```

MIN=Cmax+(Epsilon*@SUM(Estructuras(j):Hmax(j))); !FUNCION OBJETIVO;

@FOR(Geometrias(i):@SUM(Estructuras(j):@SUM(Orientacion(k):X(i,j,k)))=1);
@FOR(Estructuras(j):@SUM(Geometrias(i):@SUM(Orientacion(k):A(i,k)*X(i,j,k)))<=MA);
@FOR(Estructuras(j)|j#LE#(Nb-1):@SUM(Geometrias(i):@SUM(Orientacion(k):X(i,j+1,k)))<=(Ng*@SUM(Geometrias(i):@SUM(Orientacion(k):X(i,j,k)))));
@FOR(Estructuras(j):PT(1)<=C(1)); !Restriccion 4a;
@FOR(Estructuras(j)|j#GE#2:C(j-1)+PT(j)<=C(j)); !Restriccion 4b;
@FOR(Estructuras(j):PT(j)=(SET*Z(j))+VT*@SUM(Geometrias(i):@SUM(Orientacion(k):V(i)*X(i,j,k))))+(HT*Hmax(j));
@FOR(Estructuras(j):@SUM(Geometrias(i):@SUM(Orientacion(k):X(i,j,k)))<=Ng*Z(j));
@FOR(Estructuras(j):C(j)<=Cmax);
@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):@SUM(Orientacion(k):H(i,k)*X(i,j,k))<=Hmax(j)));

!RESTRICCIONES DE TIPO DE VARIABLES;
@FOR(Geometrias(i):@FOR(Estructuras(j):@FOR(Orientacion(k):@BIN(X(i,j,k))));
@FOR(Estructuras(j):@BIN(Z(j)));

END

```

Figura 4-9. Función objetivo y restricciones M/M/S 2O.

5 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se llevará a cabo la experimentación para los tres modelos. Se explica cómo se han generado las diferentes instancias, para posteriormente plasmar los resultados obtenidos para los modelos con una y varias orientaciones. Finalmente, se analiza el efecto que tiene la multiorientación de piezas en los diferentes modelos.

5.1. Generación de instancias

La generación de nuevas instancias para llevar a cabo la experimentación se realizará a partir de las instancias usadas por Kucukkoc (2019). La experimentación consiste en la ejecución de 62 instancias que aumentan progresivamente su dificultad computacional, debido al incremento de piezas y máquinas. Habrá que modificar las 62 instancias para adaptarlas a los problemas con varias orientaciones, en total serán 186 problemas para resolver.

- P1-P14: M/M/S 1O, 2O, 3O.
- P15-P38: M/M/iM 1O, 2O, 3O.
- P39-P62: M/M/nM 1O, 2O, 3O.

Para generar las nuevas orientaciones, aplicaremos una relación altura-superficie a cada pieza. Es decir, para generar la segunda orientación reduciremos la altura y aumentaremos la superficie que ocupa la pieza proporcionalmente, y para generar la tercera aumentaremos la superficie y reduciremos la altura de la misma forma. Considerando grupos de 5 piezas, para calcular las dimensiones de la segunda orientación multiplicaremos la altura de cada pieza por los siguientes factores respectivamente: $1/2$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$.

Pieza	Relación altura O2	Relación superficie O2	Relación altura O3	Relación superficie O3
1	$1/2$	2	2	$1/2$
2	$2/3$	$3/2$	$3/2$	$2/3$
3	$3/4$	$4/3$	$4/3$	$3/4$
4	$4/5$	$5/4$	$5/4$	$4/5$
5	$5/6$	$6/5$	$6/5$	$5/6$

Tabla 5-1. Relación altura-superficie de las piezas.

En la siguiente tabla, aplicaremos la relación altura-superficie con el objetivo de calcular los datos de cada pieza para la segunda orientación. La primera columna representa la pieza y la segunda la orientación a la que pertenecen los datos. Es decir, la altura de la pieza 1 con orientación 2 será de 8,565 cm.

20		HIK	AIK
1	1	17,13	48,27
1	2	8,565	96,54
2	1	2,67	84,97
2	2	1,7889	126,8209
3	1	33,23	248,68
3	2	24,9225	331,5733
4	1	10,77	269,75
4	2	8,616	337,1875
5	1	26,67	258,54
5	2	22,1361	311,494
6	1	14,38	114,56
6	2	7,19	229,12

Tabla 5-2. Datos para el problema 1 (Kucukkoc,2019) con 2 orientaciones.

5.2. Resultados computacionales

Tras modificar las instancias para adaptarlas a los problemas de varias orientaciones es el momento de llevar a cabo la experimentación. Para ello, se ha limitado el tiempo de resolución de todos los problemas a 3600 segundos (1 hora), debido que al aumentar progresivamente la dificultad computacional algunos problemas tardarían demasiado en resolverse de forma óptima. La solución para aquellos problemas en los que se alcance una solución antes del límite será considerada como óptimo global del problema, en caso contrario, no se asegura la optimalidad del problema y se presentará la mejor solución hallada dentro del intervalo de tiempo.

5.2.1. Comparación para problemas con 1 orientación.

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos para los tres tipos de problemas, teniendo en cuenta una única orientación posible para cada pieza.

PROBLEMA M/M/S 10						
PROBLEMA	INPUT		OUTPUT			
	Geometrías	Trabajos	Cmax (h)	$\sum Z_j$	OPTIMALIDAD	TIEMPO CPU (s)
P1	6	3	201,36	2	SI	0.21
P2	6	3	198,83	2	SI	0.19
P3	7	4	181,24	3	SI	0.93
P4	7	3	173,83	2	SI	0.69
P5	8	4	190,96	3	SI	0.52
P6	8	3	183,55	2	SI	0.29
P7	9	5	266,10	4	SI	1.42
P8	9	4	254,00	3	SI	0.74
P9	10	5	283,03	4	SI	1.37
P10	10	4	275,63	3	SI	0.77
P11	11	5	374,22	4	SI	2.02
P12	11	4	364,85	3	SI	1.28
P13	12	7	538,09	5	SI	36.90
P14	12	6	528,12	4	SI	5.74

Tabla 5-3. Resultados M/M/S 10.

La Tabla 5-3 plasma los resultados obtenidos para el primer problema M/M/S con 1 Orientación, resume los datos de cada problema (inputs) y los resultados obtenidos (outputs). La columna $\sum Z_j$ representa el número de trabajos requerido para llegar al óptimo, ya que el número de trabajos se fija como un máximo y en ocasiones, no se alcanza ese valor. Se observa que todos los resultados se obtuvieron en un tiempo bastante rápido, los únicos problemas que tardaron un poco más fueron P13 y P14, ya que, al aumentar el número de piezas y trabajos, la dificultad computacional aumenta. A pesar de ello, la dificultad computacional de estos problemas es baja, como ya iremos viendo.

PROBLEMA M/M/iM 10								
PROBLEMA	INPUT			OUTPUT				
	Geometrías	Máquinas	Trabajos	Cmax (h)	$\sum Z_j$	$\sum Z_j$	OPTIMALIDAD	TIEMPO CPU (s)
P15	15	2	3	197,51	5	[2],[3]	SÍ	118.12
P16	15	2	3	203,89	4	[2],[2]	SÍ	107.57
P17	17	2	4	389,97	6	[2],[4]	NO	>3600
P18	17	2	3	397,78	5	[3],[2]	SÍ	121.68
P19	18	2	3	381,18	6	[3],[3]	SÍ	91.58
P20	18	2	3	385,09	5	[3],[2]	SÍ	290.45
P21	21	2	3	280,61	5	[3],[2]	SÍ	1212.00
P22	21	2	3	294,95	6	[3],[3]	SÍ	1723.07
P23	22	2	3	414,32	5	[3],[2]	SÍ	414.32
P24	22	2	3	433,11	6	[3],[3]	SÍ	784.02
P25	23	2	3	435,43	5	[2],[3]	NO	>3600
P26	23	2	3	454,85	6	[3],[3]	SÍ	2694.31
P27	25	2	3	438,41	6	[3],[3]	NO	>3600
P28	25	2	3	462,36	6	[3],[3]	NO	>3600
P29	28	3	3	351,77	7	[3],[3],[1]	NO	>3600
P30	28	3	3	360,76	7	[1],[3],[3]	NO	>3600
P31	30	3	2	345,39	6	[2],[2],[2]	NO	>3600
P32	30	3	3	352,35	7	[2],[2],[3]	NO	>3600
P33	36	3	3	378,45	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
P34	36	3	3	398,79	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
P35	38	3	3	369,81	7	[2],[2],[3]	NO	>3600
P36	38	3	3	386,04	7	[2],[3],[2]	NO	>3600
P37	46	3	3	450,34	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
P38	46	3	3	460,10	8	[2],[3],[3]	NO	>3600

Tabla 5-4. Resultados M/M/iM 10.

Respecto al problema M/M/iM con 1 Orientación, en la Tabla 5-4 aparecen en los inputs el número de máquinas y se añade en los outputs una nueva columna ($\sum Z_j$), en la cual se detallan el número de trabajos necesario en cada máquina para alcanzar el óptimo. La columna anterior representa el sumatorio total de trabajos necesarios para alcanzar el óptimo.

En cuanto a los resultados obtenidos, destacan los arrojados por el P17 ya que, aunque por su número de geometrías y máquinas no presenta gran dificultad computacional, se observa que al aumentar el número máximo de trabajos a 4 el software no es capaz de resolverlo dentro del límite de tiempo. Además, el incremento de 2 a 3 máquinas que se produce de P28 a P29 reduce considerablemente el makespan, ya que a mayor número de máquinas trabajando antes concluirá la actividad de estas, como es lógico.

PROBLEMA M/M/nM 10								
PROBLEMA	INPUT			OUTPUT				
	Geometrías	Máquinas	Trabajos	Cmax (h)	$\sum\sum z_{mj}$	$\sum z_{mj}$	OPTIMALIDAD	TIEMPO CPU (s)
P39	15	2	3	195,44	5	[3],[2]	SÍ	25.87
P40	15	2	3	199,45	5	[3],[2]	SÍ	24.07
P41	17	2	3	385,59	5	[2],[3]	SÍ	124.32
P42	17	2	3	396,93	6	[3],[3]	SÍ	25.51
P43	18	2	3	372,58	6	[3],[3]	SÍ	31.69
P44	18	2	3	380,23	6	[3],[3]	SÍ	35.28
P45	21	2	3	286,53	6	[3],[3]	SÍ	819.98
P46	21	2	3	293,09	6	[3],[3]	SÍ	481.96
P47	22	2	3	425,93	6	[3],[3]	SÍ	724.46
P48	22	2	3	435,51	6	[3],[3]	SÍ	474.06
P49	23	2	3	447,48	6	[3],[3]	SÍ	1818.61
P50	23	2	3	456,31	6	[3],[3]	SÍ	1273.45
P51	25	3	3	299,10	7	[1],[3],[3]	NO	>3600
P52	25	3	3	299,71	6	[1],[3],[2]	NO	>3600
P53	28	3	3	362,22	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
P54	28	3	3	362,69	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
P55	30	3	3	353,83	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
P56	30	3	3	364,89	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
P57	36	3	3	384,34	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
P58	36	3	3	390,80	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
P59	38	3	3	435,33	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
P60	38	3	3	444,10	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
P61	46	3	4	462,92	11	[3],[4],[4]	NO	>3600
P62	46	3	3	477,24	9	[3],[3],[3]	NO	>3600

Tabla 5-5. Resultados M/M/nM 10.

La Tabla 5-5 resume los resultados para el problema M/M/nM con 1 Orientación (máquinas paralelas no idénticas). Al igual que el anterior modelo, los problemas que igualan o superan las 25 geometrías (P51 en adelante) no se resuelven dentro del límite, debido a la dificultad computacional que implican.

5.2.2. Comparación para problemas con 2 y 3 orientaciones.

En este apartado se analizarán los resultados para los problemas anteriores, pero incluyendo las variantes para dos y tres orientaciones. Al igual que en el anterior apartado, se comentarán los resultados que destaquen en cada problema. Como consecuencia de añadir la multiorientación de piezas, se añadirá una nueva columna a cada tabla que indicará la orientación de cada pieza, por lo que cada problema tendrá tres resultados diferentes.

Para el modelo M/M/S, se resuelven todos los problemas dentro del límite de tiempo establecido. En cuanto a los resultados obtenidos, se aprecia un incremento considerable de los tiempos de computación (muy bajos aún) al añadir nuevas orientaciones, como consecuencia de añadir un nuevo índice al modelo, lo que aumenta su dificultad computacional. Esto provocará que problemas que se resuelven dentro del límite para una orientación, no lo hagan para dos y tres orientaciones.

PROBLEMA M/M/S							
PROBLEMA	ORIENTACIONES	INPUT		OUTPUT			
		Geometrías	Trabajos	Cmax (h)	$\sum Z_j$	OPTIMALIDAD	TIEMPO CPU (s)
P1	1	6	3	201,36	2	SI	0.21
	2			196,69	3	SI	0.43
	3			196,12	2	SI	1.62
P2	1	6	3	198,83	2	SI	0.19
	2			191,51	2	SI	0.37
	3			191,51	2	SI	1.06
P3	1	7	4	181,24	3	SI	0.93
	2			175,41	3	SI	0.70
	3			173,34	2	SI	1.98
P4	1	7	3	173,83	2	SI	0.69
	2			169,16	2	SI	0.95
	3			168,45	2	SI	1.34
P5	1	8	4	190,96	3	SI	0.52
	2			186,13	3	SI	1.76
	3			185,06	3	SI	1.92
P6	1	8	3	183,55	2	SI	0.29
	2			183,25	2	SI	1.23
	3			179,28	2	SI	0.57
P7	1	9	5	266,10	4	SI	1.42
	2			261,10	4	SI	2.75
	3			254,96	3	SI	2.73
P8	1	9	4	254,00	3	SI	0.74
	2			250,46	3	SI	2.15
	3			247,89	3	SI	2.54
P9	1	10	5	283,03	4	SI	1.37
	2			276,68	4	SI	5.97
	3			275,90	3	SI	42.31
P10	1	10	4	275,63	3	SI	0.77
	2			269,89	3	SI	3.28
	3			266,83	3	SI	6.11
P11	1	11	5	374,22	4	SI	2.02
	2			371,05	4	SI	29.30
	3			367,84	4	SI	195.33
P12	1	11	4	364,85	3	SI	1.28
	2			360,58	4	SI	6.82
	3			355,60	3	SI	8.59
P13	1	12	7	538,09	5	SI	36.90
	2			529,44	5	SI	69.94
	3			526,92	4	SI	1578.46
P14	1	12	6	528,12	4	SI	5.74
	2			523,05	4	SI	68.00
	3			519,35	3	SI	115.65

Tabla 5-6. Comparación 20 y 30 M/M/S.

PROBLEMA M/M/iM									
PROBLEMA	ORIENTACIONES	INPUT			OUTPUT				
		Geometrías	Máquinas	Trabajos	Cmax (h)	$\sum\sum Z_{mj}$	$\sum Z_{mj}$	OPTIMALIDAD	TIEMPO CPU (s)
P15	1	15	2	3	197,51	5	[2],[3]	SÍ	118.12
	2				195,81	5	[3],[2]	NO	>3600
	3				194,51	5	[2],[3]	NO	>3600
P16	1	15	2	3	203,89	4	[2],[2]	SÍ	107.57
	2				198,39	5	[2],[3]	NO	>3600
	3				198,78	4	[2],[2]	NO	>3600
P17	1	17	2	4	389,97	6	[2],[4]	NO	>3600
	2				387,89	6	[4],[2]	NO	>3600
	3				387,38	6	[2],[4]	NO	>3600
P18	1	17	2	3	397,78	5	[3],[2]	SÍ	121.68
	2				393,07	5	[2],[3]	SÍ	1735.12
	3				392,07	5	[2],[3]	NO	>3600
P19	1	18	2	3	381,18	6	[3],[3]	SÍ	91.58
	2				381,18	6	[3],[3]	SÍ	127.28
	3				373,82	5	[2],[3]	NO	>3600
P20	1	18	2	3	385,09	5	[3],[2]	SÍ	290.45
	2				382,05	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				379,23	5	[2],[3]	NO	>3600
P21	1	21	2	3	280,61	5	[3],[2]	SÍ	1212.00
	2				279,85	5	[2],[3]	NO	>3600
	3				278,80	4	[2],[2]	NO	>3600
P22	1	21	2	3	294,95	6	[3],[3]	SÍ	1723.07
	2				294,49	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				294,96	5	[2],[3]	NO	>3600
P23	1	22	2	3	414,32	5	[3],[2]	SÍ	414.32
	2				413,19	5	[2],[3]	NO	>3600
	3				411,86	6	[3],[3]	NO	>3600

P24	1	22	2	3	433,11	6	[3],[3]	SÍ	784.02
	2				429,96	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				433,11	6	[3],[3]	NO	>3600
P25	1	23	2	3	435,43	5	[2],[3]	NO	>3600
	2				435,66	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				432,39	5	[2],[3]	NO	>3600
P26	1	23	2	3	454,85	6	[3],[3]	SÍ	2694.31
	2				458,43	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				451,41	5	[3],[2]	NO	>3600
P27	1	25	2	3	438,41	6	[3],[3]	NO	>3600
	2				437,71	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				436,69	5	[2],[3]	NO	>3600
P28	1	25	2	3	462,36	6	[3],[3]	NO	>3600
	2				463,59	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				464,35	6	[3],[3]	NO	>3600
P29	1	28	3	3	351,77	7	[3],[3],[1]	NO	>3600
	2				347,65	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
	3				343,17	6	[2],[1],[3]	NO	>3600
P30	1	28	3	3	360,76	7	[1],[3],[3]	NO	>3600
	2				354,31	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
	3				361,86	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
P31	1	30	3	2	345,39	6	[2],[2],[2]	NO	>3600
	2				339,61	6	[2],[2],[2]	NO	>3600
	3				343,36	6	[2],[2],[2]	NO	>3600
P32	1	30	3	3	352,35	7	[2],[2],[3]	NO	>3600
	2				345,43	7	[1],[3],[3]	NO	>3600
	3				357,09	5	[2],[1],[2]	NO	>3600
P33	1	36	3	3	378,45	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
	2				371,22	9	[3],[3],[3]	NO	>3600

Modelado y resolución de problemas de programación de la producción en fabricación aditiva con múltiples9

orientaciones de piezas y mínimo tiempo de finalización									
	3				368,96	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
P34	1	36	3	3	398,79	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
	2				385,54	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
	3				381,51	7	[3],[3],[1]	NO	>3600
P35	1	38	3	3	369,81	7	[2],[2],[3]	NO	>3600
	2				366,87	7	[3],[2],[2]	NO	>3600
	3				370,70	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
P36	1	38	3	3	386,04	7	[2],[3],[2]	NO	>3600
	2				386,39	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	3				389,03	6	[3],[1],[2]	NO	>3600
P37	1	46	3	3	450,34	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
	2				447,54	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	3				438,32	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
P38	1	46	3	3	460,10	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
	2				474,61	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
	3				506,88	9	[3],[3],[3]	NO	>3600

Tabla 5-7. Comparación 2O y 3O M/M/iM.

La Tabla 5-7 muestra los resultados obtenidos para el problema M/M/iM con 2 y 3 orientaciones, se observa que al añadir las nuevas orientaciones problemas como el P20 que deberían resolverse dentro del límite, no se resuelven para dos y tres orientaciones, debido a la dificultad computacional que implican, como ya se comentó anteriormente. Aparecen señalados en negrita aquellos resultados del C_{max} para dos y tres orientaciones que superan el valor del C_{max} para una orientación. El principal objetivo de la multiorientación de piezas es reducir el valor de C_{max} , pero en algunos casos al no alcanzar el óptimo dentro del límite, el valor del *makespan* para dos y tres orientaciones es mayor que el obtenido para una orientación.

PROBLEMA M/M/nM									
PROBLEMA	ORIENTACIONES	INPUT			OUTPUT				
		Geometrías	Máquinas	Trabajos	Cmax (h)	$\sum\sum Z_{mj}$	$\sum Z_{mj}$	OPTIMALIDAD	TIEMPO CPU (s)
P39	1	15	2	3	195,44	5	[3],[2]	SÍ	25.87
	2				193,60	5	[3],[2]	SÍ	3422.09
	3				193,07	5	[3],[2]	NO	>3600
P40	1	15	2	3	199,45	5	[3],[2]	SÍ	24.07
	2				197,15	5	[3],[2]	NO	>3600
	3				195,01	4	[2],[2]	NO	>3600
P41	1	17	2	3	385,59	5	[2],[3]	SÍ	124.32
	2				383,80	5	[2],[3]	NO	>3600
	3				381,06	5	[2],[3]	NO	>3600
P42	1	17	2	3	396,93	6	[3],[3]	SÍ	25.51
	2				392,78	6	[3],[3]	SÍ	330.37
	3				389,41	5	[2],[3]	NO	>3600
P43	1	18	2	3	372,58	6	[3],[3]	SÍ	31.69
	2				371,77	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				368,86	5	[2],[3]	NO	>3600
P44	1	18	2	3	380,23	6	[3],[3]	SÍ	35.28
	2				377,84	6	[3],[3]	SÍ	894.21
	3				376,45	6	[3],[3]	NO	>3600
P45	1	21	2	3	286,53	6	[3],[3]	SÍ	819.98
	2				286,73	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				287,89	6	[3],[3]	NO	>3600
P46	1	21	2	3	293,09	6	[3],[3]	SÍ	481.96
	2				292,86	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				292,18	5	[3],[2]	NO	>3600
P47	1	22	2	3	425,93	6	[3],[3]	SÍ	724.46
	2				424,22	6	[3],[3]	SÍ	1329.07
	3				419,37	6	[3],[3]	NO	>3600

P48	1	22	2	3	435,51	6	[3],[3]	SÍ	474.06
	2				434,21	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				427,28	6	[3],[3]	NO	>3600
P49	1	23	2	3	447,48	6	[3],[3]	SÍ	1818.61
	2				447,48	6	[3],[3]	NO	>3600
	3				441,60	5	[3],[2]	NO	>3600
P50	1	23	2	3	456,31	6	[3],[3]	SÍ	1273.45
	2				458,30	6	[3],[3]	SÍ	1308.27
	3				450,02	5	[2],[3]	NO	>3600
P51	1	25	3	3	299,10	7	[1],[3],[3]	NO	>3600
	2				300,29	7	[3],[1],[3]	NO	>3600
	3				295,85	6	[2],[1],[3]	NO	>3600
P52	1	25	3	3	299,71	6	[1],[3],[2]	NO	>3600
	2				303,41	7	[1],[3],[3]	NO	>3600
	3				299,19	7	[2],[2],[3]	NO	>3600
P53	1	28	3	3	362,22	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	2				355,92	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
	3				356,16	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
P54	1	28	3	3	362,69	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
	2				356,76	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
	3				356,41	7	[3],[3],[1]	NO	>3600
P55	1	30	3	3	353,83	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
	2				349,77	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
	3				345,04	6	[2],[2],[2]	NO	>3600
P56	1	30	3	3	364,89	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
	2				352,23	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
	3				349,76	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
P57	1	36	3	3	384,34	8	[2],[3],[3]	NO	>3600
	2				384,60	9	[3],[3],[3]	NO	>3600

Modelado y resolución de problemas de programación de la producción en fabricación aditiva con múltiples

orientaciones de piezas y mínimo tiempo de finalización

	3				390,09	8	[3],[2],[3]	NO	>3600
P58	1	36	3	3	390,80	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	2				402,54	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	3				386,83	7	[2],[2],[3]	NO	>3600
P59	1	38	3	3	435,33	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	2				407,43	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	3				386,59	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
P60	1	38	3	3	444,10	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	2				414,40	8	[3],[3],[2]	NO	>3600
	3				385,75	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
P61	1	46	3	4	462,92	11	[3],[4],[4]	NO	>3600
	2				461,08	12	[4],[4],[4]	NO	>3600
	3				456,31	10	[4],[3],[3]	NO	>3600
P62	1	46	3	3	477,24	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	2				466,64	9	[3],[3],[3]	NO	>3600
	3				477,27	9	[3],[3],[3]	NO	>3600

Tabla 5-8. Comparación 2O y 3O M/M/nM.

5.2.3. Efecto de la multiorientación de piezas.

Tras la experimentación y haber obtenido una cantidad suficiente de resultados concluyentes, analizaremos gráficamente si la multiorientación de piezas ha sido un método eficaz para reducir el tiempo máximo de terminación de los trabajos en máquinas de fabricación aditiva. A continuación, se muestran gráficamente los resultados obtenidos para los tres tipos de problemas.

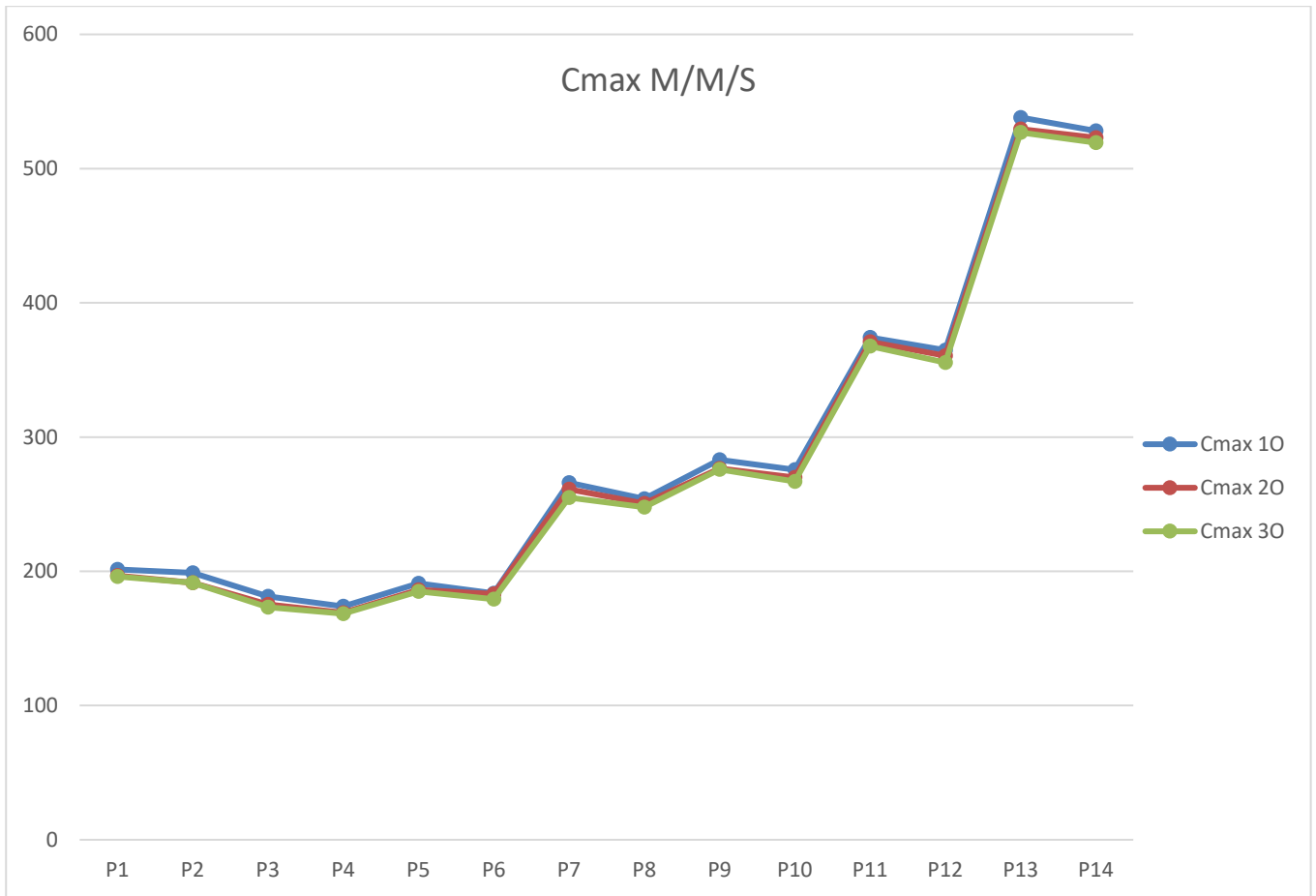


Figura 5-1. Comparativa M/M/S.

Gracias a la multiorientación de piezas el makespan se ve reducido considerablemente en los problemas con dos y tres orientaciones. Para dos orientaciones, el valor medio del makespan es 5 horas menor mientras que para tres orientaciones, mejora aún más y se obtiene un valor medio 7 horas menor, aproximadamente.

MEDIA CMAX M/M/S	
10	286,7007143
20	281,7428571
30	279,2178571

Tabla 5-9. Valor medio Cmax M/M/S.

EFECTO DE LA MULTIORIENTACIÓN	
20	Mejora 5%
30	Mejora 7%

Tabla 5-10. Efecto de la multiorientación M/M/S.

Habiendo comprobado el impacto positivo que tiene la multiorientación de piezas para el primer problema, analizaremos los resultados para los otros dos problemas.

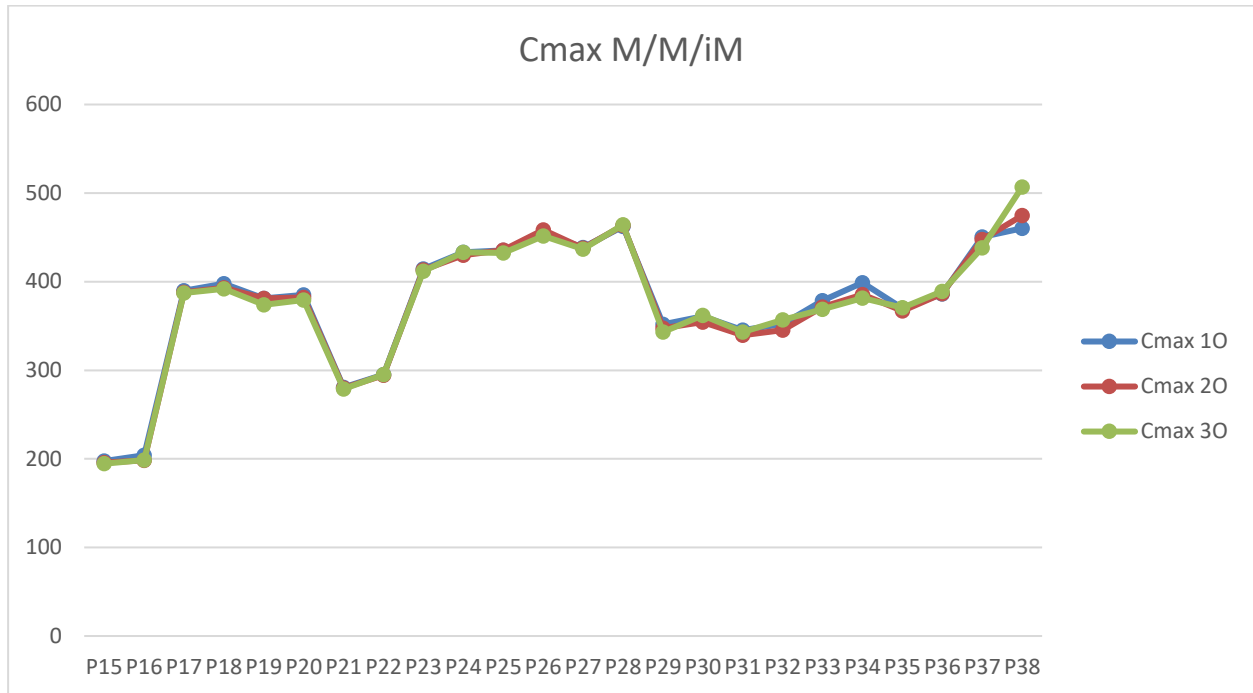


Figura 5-2. Comparativa M/M/iM.

MEDIA CMAX M/M/iM	
10	375,969167
20	373,768333
30	374,593333

Tabla 5-11. Valor medio Cmax M/M/iM.

EFECTO DE LA MULTIORIENTACIÓN	
20	Mejora 2%
30	Mejora 1%

Tabla 5-12. Efecto de la multiorientación M/M/iM.

Para el segundo problema, el valor medio del *makespan* mejora en 2 horas para las instancias con dos posibles orientaciones, mientras que para tres orientaciones mejora el valor inicial en 1 hora. Aunque la mejora no es tan significativa como la del primer problema, debemos tener en cuenta que hablamos del valor medio del *makespan* y que una o dos horas de mejora de media sigue siendo un gran resultado, pues el principal problema de la fabricación aditiva son los elevados tiempos de producción. Hay que señalar que con 3 Orientaciones se empeora los resultados respecto a 2 Orientaciones debido a que no se alcanzan los valores óptimos en la experimentación por limitación del tiempo máximo de CPU.

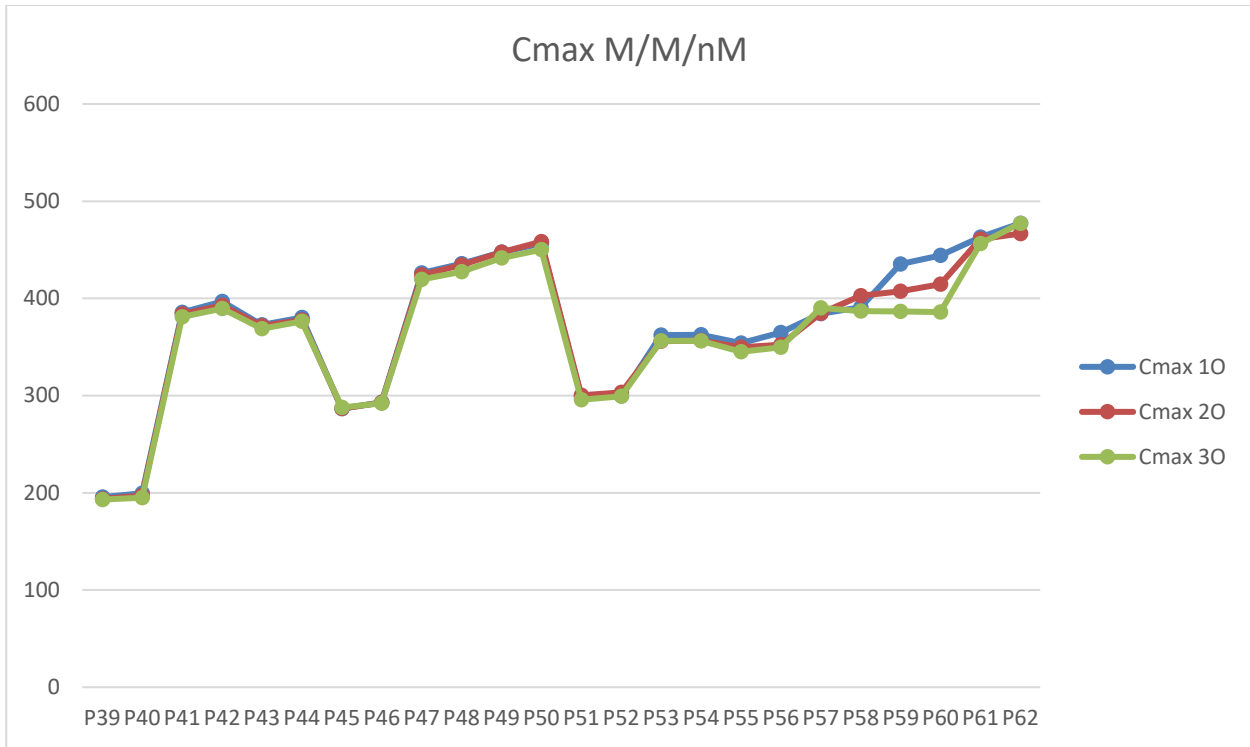


Figura 5-3. Comparativa M/M/nM.

MEDIA CMAX M/M/nM	
10	371,343333
20	367,325417
30	362,810417

Tabla 5-13. Valor medio Cmax M/M/nM.

EFECTO DE LA MULTIORIENTACIÓN	
20	Mejora 4%
30	Mejora 9%

Tabla 5-14. Efecto de la multiorientación M/M/nM.

Para el problema con máquinas paralelas no idénticas obtenemos los mejores resultados de los experimentos realizados. Se observa una mejora de 4 horas para los problemas con dos posibles orientaciones, y de 9 horas para aquellos con tres posibles orientaciones. Los resultados obtenidos para el último problema son un éxito, ya que, al tratarse de máquinas paralelas no idénticas, se consigue optimizar la producción, ya que aquellas máquinas más rápidas o con mayor capacidad liberan aquellas máquinas más limitadas, que sumado a la multiorientación de piezas proporciona grandes resultados.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han planteado modelos de programación lineal mixta entera para la resolución del problema de programación de la producción de múltiples partes en máquinas de fabricación aditiva con el criterio de minimizar el tiempo máximo de fabricación de todas las partes y añadiendo como variante del problema la posibilidad de múltiples orientaciones de las partes para su fabricación.

En el anterior capítulo se han analizado los resultados obtenidos tras la experimentación mediante el uso del software comercial LINGO, siendo éstos bastante positivos, ya que, con la multiorientación de piezas, se consigue reducir el tiempo máximo de terminación de los trabajos (makespan).

A lo largo de este trabajo, el objetivo principal ha sido reducir el valor del makespan, ya que es uno de los principales inconvenientes de la fabricación aditiva hoy en día. En este caso, se ha conseguido a través de la multiorientación de piezas, pero de cara a un futuro, los tiempos de fabricación se verían sustancialmente reducidos si se mejora el tiempo empleado por unidad de volumen (VT) de las diferentes máquinas. A través de dotar a las piezas de múltiples orientaciones, conseguimos modificar proporcionalmente el área proyectada sobre la superficie de la bandeja y la altura de la pieza, pero evidentemente el volumen de las piezas siempre será el mismo. Ante la imposibilidad de reducir este valor, la principal solución será trabajar en completar la pieza lo antes posible, de ahí la importancia de reducir el valor de VT.

En conclusión, con los medios actuales se pueden reducir los tiempos de producción en la fabricación aditiva obteniendo resultados bastante positivos, pero el futuro de la fabricación aditiva pasa por mejorar las características de las máquinas, una vez conseguido esto, los tiempos de fabricación se verán reducidos considerablemente.

REFERENCIAS

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2). https://doi.org/10.1177/1687814018822880/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1687814018822880-FIG2.JPEG
- Chergui, A., Hadj-Hamou, K., & Vignat, F. (2018). Production scheduling and nesting in additive manufacturing. *Computers and Industrial Engineering*, 126, 292–301. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2018.09.048>
- Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials 2017, Vol. 10, Page 672, 10(6)*, 672. <https://doi.org/10.3390/MA10060672>
- Kalita, S. J. (2010). Rapid prototyping in biomedical engineering: structural intricacies of biological materials. *Biointegration of Medical Implant Materials: Science and Design*, 349–397. <https://doi.org/10.1533/9781845699802.3.349>
- Kucukkoc, I. (2019). MILP models to minimise makespan in additive manufacturing machine scheduling problems. *Computers and Operations Research*, 105, 58–67. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2019.01.006>
- La historia de la impresora 3D: los orígenes de las primeras máquinas.* (n.d.). Retrieved January 11, 2023, from <https://abax3dtech.com/2020/07/24/historia-de-la-impresora-3d/>
- Li, Y., Mao, Q., Yin, J., Wang, Y., Fu, J., & Huang, Y. (2021). Theoretical prediction and experimental validation of the digital light processing (DLP) working curve for photocurable materials. *Additive Manufacturing*, 37, 101716. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101716>
- Nandy, J., Sarangi, H., & Sahoo, S. (2019). A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 6(3), 280–316. <https://doi.org/10.1007/S40516-019-00094-Y/TABLES/4>
- Oh, Y., Witherell, P., Lu, Y., & Sprock, T. (2020). Nesting and scheduling problems for additive manufacturing: A taxonomy and review. *Additive Manufacturing*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101492>
- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873–3882. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.642>
- What is Additive Manufacturing | GE Additive.* (n.d.). Retrieved January 11, 2023, from <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>