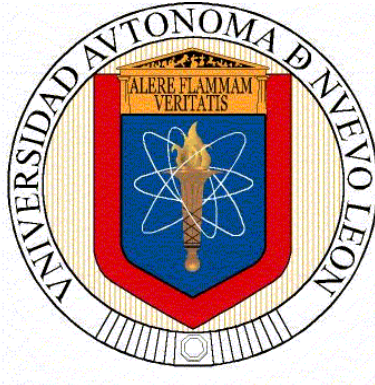


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

**RE PLANEACIÓN MULTICRITERIO EN
MANUFACTURA ADITIVA CON MÉTODO DE
JOB SHOP Y USO DE REGLAS DE PRIORIDAD**

PRESENTADA POR

JUAN JESÚS TELLO RODRÍGUEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS**

ENERO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

POSGRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS



RE PLANEACIÓN MULTICRITERIO EN
MANUFACTURA ADITIVA CON MÉTODO DE JOB
SHOP Y USO DE REGLAS DE PRIORIDAD

POR

JUAN JESÚS TELLO RODRÍGUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA EN SISTEMAS

ENERO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Re planeación multicriterio en Manufactura Aditiva con método de Job Shop y uso de reglas de prioridad", realizada por el estudiante Juan Jesús Tello Rodríguez, con número de matrícula 1463425, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Sistemas .

El Comité de Evaluación de Tesis

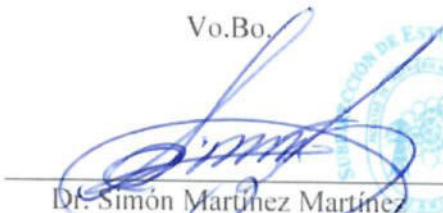
Dr. Fernando López Irarragorri
Director

Dr. Romeo Sánchez Nigenda
Revisor

Dr. Igor Semionovich Litvinchev
Revisor

Dra. Yasmin A. Ríos Solís
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 557520

Acta Núm. 4453

Ciudad Universitaria, a 23 Septiembre 2024.

*A mi esposa Lily
por siempre apoyarme en mis pasiones.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XI
Resumen	XII
1. Introducción	1
1.1. Importancia de la investigación	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivo	2
1.4. Objetivos particulares	2
1.5. Alcance	3
1.6. Metodología de la investigación	3
1.7. Resultados esperados	4
1.8. Limitaciones	5
1.9. Aportes al conocimiento	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Manufactura aditiva	6

2.2. Apoyo a la toma de decisiones	10
2.3. Programación Entera Mixta	13
2.4. Secuenciamiento	14
2.5. Job Shop	19
2.5.1. Reglas de prioridad	23
2.6. Optimización multiobjetivo	24
2.7. Scheduling multiobjetivo	26
2.8. Scheduling en manufactura aditiva	27
3. Descripción del problema y Metodología	30
3.1. Proceso de fabricación	30
3.2. Características de la planeación y secuenciamiento	32
3.2.1. Características del proceso	33
3.3. Retos a la solución del problema	34
3.4. Metodología propuesta	36
3.5. Modelo matemático para secuenciamiento	38
3.5.1. Consideraciones	38
3.5.2. Conjuntos	39
3.5.3. Parámetros	39
3.5.4. Variables de decisión	41
3.5.5. Criterios a optimizar	42

3.5.6. Restricciones	42
3.6. Agrupamiento de ordenes para el periodo	44
3.6.1. Reglas consideradas	46
3.7. Secuenciamiento mediante reglas de prioridad	46
3.7.1. Estación de diseño	47
3.7.2. Estación de impresión	48
3.7.3. Reglas de prioridad consideradas	48
3.7.4. Re secuenciamiento	49
4. Análisis de resultados	50
4.1. Desempeño del modelo MILP	50
4.1.1. Instancias utilizadas	51
4.1.2. Óptimos individuales	52
4.1.3. Efecto de las máquinas disponibles	53
4.1.4. Efecto de ordenes a secuenciar	54
4.1.5. Efecto de duración del periodo	56
4.1.6. Frente de Pareto	57
4.2. Desempeño de heurístico con reglas de prioridad	60
4.2.1. Funciones individuales	60
4.2.2. Efecto de las máquinas disponibles	62
4.2.3. Efecto de ordenes a secuenciar	62

4.2.4. Efecto de duración del periodo	63
4.2.5. Frente de Pareto	64
4.3. Comparación	65
5. Conclusiones	67
5.1. Conclusiones	67
5.2. Trabajo a futuro	68

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Proceso fabricacion.	31
3.2. Proceso secuenciamiento inicial.	32
3.3. Toma decisiones actual.	35
3.4. Proceso secuenciamiento.	36
4.1. Comparación objetivos individuales en modelo.	52
4.2. Efecto por máquinas disponibles en modelo.	54
4.3. Iteraciones por efecto de máquinas en modelo.	54
4.4. Objetivos alcanzados por efecto de ordenes procesadas en modelo. . .	55
4.5. Iteraciones por efecto de ordenes procesadas en modelo.	55
4.6. Objetivos alcanzados por efecto de duración de periodo en modelo. .	56
4.7. Iteraciones por efecto de duración de periodo en modelo.	57
4.8. Frente de Pareto para Funciones 1 y 2 en modelo.	58
4.9. Frente de Pareto para Funciones 1 y 3 en modelo.	58
4.10. Frente de Pareto para Funciones 2 y 3 en modelo.	59
4.11. Comparación de objetivos individuales en heruristico.	61

4.12. Efecto por máquinas disponibles en heurístico.	62
4.13. Efecto por ordenes a procesar en heurístico.	63
4.14. Efecto por duración de periodo en heurístico.	64
4.15. Frente de Pareto para Funciones 1 y 2 en heurístico.	64
4.16. Frente de Pareto para Funciones 1 y 3 en heurístico.	65
4.17. Frente de Pareto para Funciones 2 y 3 en heurístico.	66

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Ventajas y desventajas de la manufactura aditiva	7
4.1. Resultados del modelo	52
4.2. Resultados heurístico	61

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Posgrado de Ingeniería en Sistemas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

Agradezco al Dr. Fernando Lopez por toda su paciencia, guía y apoyo para llevar este proyecto. Igualmente agradezco a mis compañeros, amigos y profesores del posgrado por su ayuda durante los estudios.

Finalmente agradezco a mi familia y en especial a mi esposa Liliana por apoyarme en la decisión de estudiar el posgrado y todo los sacrificios que conllevo, gracias a ti pude lograr una gran meta en mi vida.

RESUMEN

Juan Jesús Tello Rodríguez.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería en Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Título del estudio: RE PLANEACIÓN MULTICRITERIO EN MANUFACTURA ADITIVA
CON MÉTODO DE JOB SHOP Y USO DE REGLAS DE PRIORIDAD.

Número de páginas: ??.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Desarrollar una metodología de apoyo a la decisión multicriterio efectiva que permita maximizar el desempeño en operaciones de manufactura aditiva a través del scheduling y rescheduling, comparando distintas reglas de prioridad además de integrar los distintos subproblemas propios del proceso.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Se desarrolló un modelo matemático exacto y una heurística que resuelven el problema de secuenciamiento de operaciones de manufactura aditiva de manera satisfactoria.

Firma del asesor: _____
Dr. Fernando López Irraragorri

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva es una de las tecnologías emergentes más importantes, se estima que una gran parte de la industria aborde este método de producción a futuro, entre sus beneficios destaca los bajos desperdicios y la facilidad de crear piezas con diseños complicados. Sin embargo esta tecnología no alcanza los grandes volúmenes de producción de otros sistemas de manufactura ya establecidos, por lo que es un tema de gran importancia optimizar sus tiempos de operación. Para atender esta necesidad se investigará y desarrollará una metodología de solución con apoyo en la toma de decisiones multicriterio y modelación matemática para la planeación de operaciones mediante un modelo de Job Shop Rescheduling (JSR) con el cual se buscará tanto la minimización del tiempo de operación y entrega de productos, así como la maximización de ganancias por tareas de alta prioridad y beneficio, para lo cual se experimentará con diversas reglas de prioridad que aborden los requerimientos propios de la manufactura aditiva tales como problemas de empaquetamiento, secuenciamiento o máquinas paralelas.

1.1 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

El problema de Job Shop Rescheduling juega un papel muy importante para la programación de operaciones en las industrias inteligentes con alta demanda en

productos hechos a la medida, permitiendo minimizar no solo el tiempo de operación, sino también desperdicios y consumo energético, además de esto los modelos estocásticos y dinámicos permiten una respuesta muy rápida ante situaciones adversas como paros de maquina o cambio en los pedidos de cliente. También este problema es de gran importancia para la resiliencia de una empresa, sobre todo en estos tiempos donde el futuro inmediato es muy impredecible y cambiante y la competencia es cada vez más fuerte.

1.2 HIPÓTESIS

Tanto el apoyo a la decisión multicriterio, como la programación matemática y la incorporación de reglas de prioridad en las colas de trabajos permiten desarrollar un robusto marco de trabajo metodológico para resolver problemas complejos de Job Shop Resheduling que tienen lugar en la manufactura aditiva.

1.3 OBJETIVO

Desarrollar una metodología de apoyo a la decisión multicriterio efectiva que permita maximizar el desempeño en operaciones de manufactura aditiva a través del scheduling y rescheduling, comparando distintas reglas de prioridad además de integrar los distintos subproblemas propios del proceso.

1.4 OBJETIVOS PARTICULARES

- Desarrollar una metodología de apoyo a la decisión multicriterio para solucionar el problema de reschedulingen job shop para manufactura aditiva en tiempo y resultados competitivos con los reportados.

- Establecer las reglas de prioridad más adecuadas para abordar este problema.
- Aplicar los resultados de la investigación en una aplicación de la vida real y comprobar la efectividad de la metodología.

1.5 ALCANCE

- Comparar diferentes metodologías y reglas de prioridad para encontrar una solución al problema de rescheduling en job shop multicriterio
- Implementar estos resultados en un problema de la vida real y comprobar su efectividad

1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se realizará en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), así como en sus laboratorios del Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología (CIIDIT), pertenecientes a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Para realizar el proyecto se desarrollará la metodología experimental descrita en los siguientes puntos.

1. **Revisión bibliográfica** Como primer paso para la elaboración del proyecto, y durante todo el tiempo de desarrollo de este, se realizará la búsqueda bibliográfica de temas de interés relacionados tales como: Scheduling en manufactura aditiva, rescheduling, reglas de prioridad, decisión multicriterio, etc. Con esto, se sentarán las bases del presente trabajo de investigación.
2. **Recolección de datos del proceso** Se recolectarán y clasificarán datos de una empresa real de área de manufactura aditiva, esta información será usada para la caracterización de trabajos y tareas dentro del modelo de Job Shop, y en la generación de instancias para los experimentos computacionales.

3. **Generación de instancias** De los datos recolectados se generarán instancias que representen lo mejor posible el proceso de la empresa y permitan medir la eficacia y sensibilidad del modelo y reglas de prioridad usados. Como estas instancias serán posteriormente usadas en un diseño de experimentos, es necesario que su generación sea acorde a lo planteado en el experimento.
4. **Formulación modelo matemático** Se generará un modelo matemático para el apoyo en la toma de decisión multicriterio de minimización de tiempo de operación, maximización de ganancias y beneficio por prioridad, tomando como base los modelos ya reportados de Job Shop Rescheduling, además de la incorporación de los demás sub problemas correspondientes al proceso de manufactura aditiva tales como problemas de empaquetamiento, secuenciamiento y generación de lotes. Los modelos se desarrollarán el solver comercial GAMS y se resolverán usando el motor de optimización lineal CPLEX v12, se buscará que el modelo se desempeñe en un tiempo no mayor al reportado en literatura y alcance gaps relativos similares a los ya reportados.
5. **Análisis de resultados** Se comparará la información de cada regla de prioridad y se establecerá si es o no adecuado su uso para el problema de Job Shop Rescheduling en manufactura aditiva, resulta ser adecuado se establecerá bajo que escenarios es recomendable usar la regla de prioridad. Finalmente se comparará con lo reportado en literatura

1.7 RESULTADOS ESPERADOS

Desarrollar una metodología de apoyo a la decisión con reglas de prioridad generadas a partir de un modelo matemático y validada en base a experimentación computacional, se espera que los resultados sean al menos tan buenos como los reportados en la literatura. Implementación de una herramienta de apoyo a la decisión para la solución del problema sujeto a estudio.

1.8 LIMITACIONES

- El modelo no abordará problemas de anidamiento.
- No se considerarán limitaciones geometricas en el acomodo de piezas.

1.9 APORTES AL CONOCIMIENTO

El problema propuesto, de una variante del problema de JSR, no ha sido abordada en trabajos previos revisados, así como la propuesta de una metodología de solución basada en el apoyo a la decisión multicriterio y la modelación matemática.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se tratarán los fundamentos teóricos de las tecnologías usadas, modelos matemáticos y métodos de solución clásicos para abordar la toma de decisiones multicriterio para el caso de estudio.

2.1 MANUFACTURA ADITIVA

Corresponde al conjunto de tecnologías de manufactura donde se fabrica un sólido tridimensional a partir de un modelo computarizado depositando finas capas de material hasta dar forma a la pieza (6). Es considerada una de las tecnologías emergentes más importantes ya que presenta una cantidad considerable de beneficios que se acoplan de manera armonioza con la industria 4.0 y la digitalización de la manufactura. (37)

La facilidad de diseñar piezas con software de CAD/CAM, el abaratamiento, desarrollo y variedad de materiales (metales, papel, cerámica, polimeros, etc), las mejoras en escaneres para copiar”piezas, esculturas o incluso organismos vivos y partes del cuerpo y otros muchos factores (38) han dado un gran impulso a la tecno-

logía de la manufactura aditiva, tan solo en el 2019 su industria tuvo un incremento global del 21 %, equivalente a casi 12 mil millones de dolares (7).

TABLA 2.1: Ventajas y desventajas de la manufactura aditiva

Ventajas	Desventajas
Fabricación de prototipos rápida.	Piezas débiles en uno de sus ejes.
Gran flexibilidad de personalización de piezas	Volumen de producción bajo.
Consumo energético bajo.	Acabados finales no deseables.

En la manufactura aditiva se utilizan varias tecnologías, como se menciona en (5). Todas ellas aun siguen desarrollandose y mejorando, y se espera que en el futuro compitan contra las tecnologías tradicionales en cuanto a volumen de fabricación, incluso los avances de esta tecnología permite contar con equipo de escritorio con el cual fabricar prototipos desde la comodidad de tu casa u oficina. A continuación se enlistan las más populares (1):

- **Estereolitografía:** Un deposito de resina líquida fotopolimerica es solidificada de manera selectiva al ser irradiada por una fuente de luz (laser).
 - Generalmente usada para la creación de prototipos, modelos o fabricación de moldes.
 - Solamente pueden usarse resinas o polimeros fotosensibles.
 - El acabado de las piezas es bastante bueno y su fabricación es relativamente rápida
 - La variedad de materiales que pueden usarse es bastante baja y su costo es relativamente elevado, además de esto en el proceso se pueden presentar porosidades en la estructura, afectando sus propiedades mecánicas.
- **Fusión de lecho en polvo:** Materiales en polvo son consolidados al fundirlos de manera selectiva por medio de una fuente de calor (laser o rayo de electrones).

- Se aplica tanto en industria aeroespacial o automotriz para fabricar piezas de vehiculos, como tambien en medicina dental o joyeria.
 - Principalmente usa metales y sus aleaciones, pero tambien es posible usar polímeros.
 - El polvo no fundido funciona como soporte, por lo que es posible usarlo en geometrias de muy alta complejidad, por lo anterior es usada tambien a nivel industrial
 - Tanto el equipo como su operacion es bastante costoso y más al aumentar las dimenciones del equipo, además de esto es común que se tenga que trabajar en zonas de ambiente controlado.
- **Inyección por aglutinante:** Se aplican de manera selectiva agentes líquidos aglutinantes sobre material en polvo, de manera que se forman capas de material aglutinado.
- Es usada para la fabricación de prototipos, modelos a escala u ornamentos.
 - Como material base se pueden usar tanto polimeros, metales o cerámicos, todos ellos en polvo. Como aglutinante generalmente se usa resina curable o con propiedades adhesivas.
 - Su velocidad de fabricación es de las más rápidas dentro de esta manufactura, permite el uso de una gran variedad de materiales en polvo, incluso trabajandose con distintos colores, no es necesario usar fuentes de energía para el procesamiento del material y el mismo polvo funciona como soporte de otras piezas dentro de la camara de fabricación.
 - Al ser básicamente polvo aglomerado, las piezas no poseen propiedades mecánicas útiles.
- **Inyección de material:** Se depositan de manera selectiva gotas de material curable el cual puede ser de manera fundida para solidificar por temperatura o fotocurable para solidificar con luz o rayos UV.

- Las piezas fabricadas son similares en acabado a las hechas por inyección de moldes, muchas veces usados en moldes de fundición a la cera perdida.
 - Se usan distintos tipos de plásticos y ceras.
 - Las piezas tienen un acabado superficial de muy buena calidad por lo que es poco postprocesado el que se tiene que realizar.
 - Las propiedades mecánicas del producto son pobres en comparación a las otras tecnologías.
- **Laminación de hojas:** Láminas de material son puestas una sobre otra, cada una de ellas es fundida a la anterior, lo innecesario es cortado en cada capa y desechado al final del proceso.
- Permite la fabricación de moldes de baja calidad.
 - Casi cualquier material que pueda ser laminado puede usarse, desde papel hasta metales.
 - La tecnología es de muy bajo costo y a su vez es de las más rápidas, esto principalmente por que las capas ya están hechas, solo son unidas una sobre otra y cortadas. También permite el uso de distintos materiales.
 - El acabado de la pieza es de muy baja calidad, esto debido a que el espesor de las laminas es considerablemente mayor que el de las capas de material en otras tecnologías.
- **Extrusión de material:** Filamentos termoplásticos son extruidos y depositados capa sobre capa hasta dar forma al objeto deseado.
- Generalmente es usada en ornamentos o piezas que no requieran gran esfuerzo mecánico.
 - Se usan polímeros termoplásticos, generalmente PLA, PC y ABS.
 - Son la opción más económica y fácil de usar, incluso pueden trabajarse en ambiente de oficina u hogar.

- El acabado a lo largo del eje vertical (eje donde se colocan las capas) es pobre respecto a las otras tecnologías.
- **Deposición directa de energía:** Polvo o alambres metálicos son alimentados en una superficie donde es soldado mediante una fuente de energía sobre la pieza.
 - Es usada tanto para la fabricación de objetos como también para la reparación o modificación de piezas.
 - Si bien pueden usarse polímeros o cerámicos, es más común el trabajarse con aleaciones metálicas tanto de acero, aluminio, níquel, titanio, etc.
 - Permite la fabricación de piezas de mayor tamaño en comparación a las demás tecnologías; también tiene un movimiento muy libre, por lo que se puede depositar material en posiciones donde otras máquinas no podrían.
 - Su acabado superficial no es muy deseable por lo que a las piezas se les tiene que realizar un postprocesado.

2.2 APOYO A LA TOMA DE DECISIONES

Podemos definir una decisión como el proceso de elección entre alternativas de acción con el fin de alcanzar una o varias metas deseadas. (?)

El apoyo a la decisión es una disciplina científica cuyo objeto es proporcionar metodologías, métodos, herramientas, para guiar a los tomadores de decisiones en el proceso de la toma de decisiones buscando la racionalidad del proceso, así como su eficiencia y eficacia desde la perspectiva del tomador de decisiones y sus preferencias.

La toma de decisiones incorpora aspectos subjetivos tales como preferencias o cualidades, es por esto que se vuelve un proceso cognitivo que puede representarse a gran escala en las siguientes fases, las cuales se pueden repetir de manera cíclica

hasta que se encuentre la mejor opción: (?)

1. **Inteligencia:** Se establecen los objetivos y alcance del problema de decisión.
2. **Diseño:** Se especifica el modelo del problema, definiendo el espacio de soluciones X , las variables de decisión X_O y la lista de criterios f_1 .
3. **Elección:** Se elige una alternativa la cual depende de los puntos anteriormente planteados, la selección puede ser hecha meramente por el encargado de la decisión (entrando en juego el pensamiento racional y emocional de la persona) o puede ser realizada por un algoritmo mediante un modelo matemático.
4. **Revisión:** Se evalúa la opción elegida en base al contexto en el que se va a aplicar, de ser necesario se repite el proceso hasta que el encargado de la decisión esté satisfecho con los resultados

Típicamente en una situación de decisión abarca diferentes elementos como:

- Tomador de decisiones (Decision Maker en inglés): Puede ser una persona o un grupo de personas. Es un rol, y es el responsable de los resultados de la decisión.
- Interesados o actores (Stake holders en inglés). Son quienes aportan información o están involucrados de alguna forma en la toma de decisiones pero no son responsables por la decisión.
- Problema de decisión: Compuesto por alternativas, consecuencias de las alternativas, criterios o atributos, entre otros.
- Recomendación: Es el resultado del proceso de apoyo a la decisión para una situación de decisión específica; generalmente desarrollada por un analista u otro especialista en apoyo a la decisión basada en las preferencias del tomador

del decisiones. Es el tomador de decisiones quien la evalúa y acepta, enmienda o rechaza y decide su implementación si procede.

Los problemas de decisión multicriterio se pueden clasificar según:

1. Según el tipo de tomador de decisión: Individual o en Grupo (si el tomador de decisiones representa a un grupo de personas, en este caso se requiere que la recomendación represente las preferencias del grupo).
2. Según la cardinalidad del conjunto de alternativas: Finito, no muy grande (Discreto), Finito pero muy grande, o infinito (Continuo u Optimización).
3. Según el conocimiento de la ocurrencia de las consecuencias asociadas a cada alternativa: certeza (sólo una consecuencia asociada a cada alternativa), incertidumbre (o riesgo) cuando hay varias consecuencias asociadas a cada alternativa y la ocurrencia de cada consecuencia está descrita por una variable aleatoria, total incertidumbre: cuando hay varias consecuencias asociadas a cada alternativa pero no se puede estimar de forma objetiva la probabilidad de ocurrencia de esas consecuencias.

Podemos desglosar la toma de decisión en función de quien realiza la decisión: que puede ser realizada por máquinas, muchas veces tomando decisiones sencillas o proporcionando información relevante; si la elección es realizada por humanos, entramos en el área de las ciencias de la decisión, la cual abarca tanto aspectos racionales (ganancias, costos, tiempo, etc) como subjetivos (beneficios personales, grupales, relaciones empresariales, etc). Esta ciencia puede ser clasificada en tres grupos: descriptiva, decisiones basadas en acciones previas; normativa, decisiones basadas en teoría y finalmente el soporte a la toma de decisiones o prescriptiva, la cual no propiamente toma una decisión, pero si presenta las alternativas adecuadas basándose en aspectos teóricos y capacidades.

La metodología de apoyo a la decisión se apoya en diversas herramientas como la investigación operativa, el análisis de decisión, sistemas de apoyo a la decisión, decisiones grupales, etc.

2.3 PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA

La programación matemática es una potente herramienta de soporte en la toma de decisiones ya que nos permite expresar cuantitativamente objetivos, restricciones y decisiones por medio de ecuaciones, inecuaciones y variables; con esto se puede limitar el espacio de búsqueda de alternativas y con distintos métodos llegar a una solución que optimice los objetivos dados.

A diferencia de la toma de decisiones, la programación matemática solo considera aspectos cuantitativos, y puede ser limitada en cuanto los problemas que puede tratar. No por esto deja de ser una valiosa herramienta para encontrar buenas alternativas a diversas decisiones.

La programación matemática se puede clasificar en base a la naturaleza de sus variables, inecuaciones, cambio con respecto al tiempo, incertidumbre, etc. Por la naturaleza del problema sujeto a estudio se describirá en mas detalle la programación entera mixta.

La programación lineal entera mixta o MILP (por sus siglas en inglés) se caracteriza por el uso de variables de decisión tanto enteras como continuas, lo que le permite modelar de una manera más completa problemas reales; pero la complejidad en la búsqueda de soluciones puede llegar a ser bastante elevado.

Por ello, a diferencia de la programación lineal emplea métodos heurísticos que brindan soluciones cercanas al óptimo.

El modelo matemático general es el siguiente (2):

$$\begin{aligned} & max cx + hy \\ & Ax + Gy \leq b \\ & x \geq 0 \\ & y \geq 0 \quad y \text{ entera} \end{aligned}$$

Donde A es una matriz de $m \times n$, G una matriz de $m \times p$, c es un vector de n filas, h es un vector de p filas, b un vector de m columnas, x un vector de n dimensiones compuesto de variables reales y finalmente y un vector de p dimensiones compuesto de variables enteras.

2.4 SECUENCIAMIENTO

El secuenciamiento o planificación (Sheduling en inglés) corresponde a un tipo de problemas en el área de la toma de decisiones que consiste en asignar o distribuir recursos a distintas tareas o actividades en un horizonte de tiempo con el fin de optimizar algún objetivo. Entre sus aplicaciones están la programación de maquinaria en una planta de manufactura, los horarios de despegue en aeropuertos, la disposición de personal en proyectos, etc. Generalmente se busca la minimización del tiempo necesario para completar alguna tarea, o el costo de completarlas en el tiempo requerido. (3)

En lo que sigue se introducen conceptos básicos y consideraciones propios de los problemas de secuenciamiento.

Primeramente se considera que el número de trabajos y máquinas disponibles son finitas, denotandose por n y por m respectivamente, cada trabajo se identifica con

el sufijo j y cada máquina con i , de manera que el par (i, j) indica que el trabajo j es procesado en la máquina i . A continuación se describirán algunos parámetros relacionados con los trabajos j .

- **Tiempo de procesamiento:** (p_{ij}) Representa el tiempo necesario para procesar el trabajo j en la máquina i . En el caso de que el tiempo no dependa de la máquina a usar o solo el trabajo solo pueda ser procesado en una máquina, entonces podemos omitir el sufijo i .
- **Fecha de liberación:** (r_j) Es el tiempo o momento en el que se puede iniciar el procesamiento del trabajo j .
- **Fecha compromiso:** (d_j) Es la fecha para la cual el trabajo j debería estar finalizado.
- **Peso:** (d_j) Corresponde a la prioridad del trabajo j , es decir su importancia relativa respecto a los demás trabajos, puede representar una ganancia o costo por el que sea necesario procesarlo antes que otros trabajos.

Dentro del tema de estudio podemos encontrar distintos tipos de scheduling que describen las restricciones y objetivos del proceso, los cuales son de vital importancia para el programador de operaciones.

- **Non-Delay Schedule:** Es una programación factible de operaciones en las que no hay máquinas detenidas mientras haya operaciones pendientes de ser procesadas en ellas.
- **Active Schedule:** Programación factible de operaciones sin interrupción en la cual no es posible crear otra programación a través de cambios en la secuencia

de operaciones con al menos una operación terminando antes y ninguna terminando después. Es decir que no es posible adelantar operaciones sin afectar la factibilidad o aumentar el tiempo de operación total.

- **Semi Active Schedule:** Programación factible de operaciones sin interrupción en la cual ninguna operación puede ser completada antes sin cambiar el orden de procesamiento de alguna de las máquinas.
- **Semi Active Schedule:** Programación en la que es posible realizar distintas tareas en una máquina al mismo tiempo, se considera que el trabajo no está listo hasta que la última tarea no esté terminada.

Un problema de scheduling puede ser descrito por una tripleta $\alpha|\beta|\gamma$, la cual indica el tipo de máquinas, características del proceso (pudiendo ser una, varias o ninguna) y el objetivo (generalmente se considera único) respectivamente.

El tipo de máquinas, correspondiente a α indica su disposición y características, el parámetro puede tomar una de las siguientes entradas:

- **Máquina única:** (1) Es el caso más sencillo donde solo se cuenta con una máquina para procesar los trabajos.
- **Máquinas paralelas idénticas:** (Pm) Se cuenta con un conjunto de m máquinas idénticas, el trabajo j puede ser procesado a la misma velocidad en cualquiera de ellas.
- **Máquinas paralelas distintas:** (Qm) Se cuenta con un conjunto de m máquinas que operan a distinta velocidad v_i , el trabajo j puede ser procesado en cualquiera de ellas pero su tiempo de procesamiento sería distinto.
- **Máquinas paralelas no relacionadas:** (Rm) Se cuenta con un conjunto de m máquinas que operan de manera distinta para cada trabajo, la velocidad de procesamiento de la máquina i para el trabajo j es v_{ij} .

- **Flow Shop:** (Fm) Se cuenta con un conjunto de máquinas en serie y trabajos, los cuales deben de ser procesados en cada una de las máquinas de manera secuencial siguiendo la misma ruta, por lo general se trabaja con la disciplina de Primeras entradas, primeras salidas FIFO.
- **Flexible Flow Shop:** (FFc) Es una generalización del modelo anterior, donde se consideran máquinas paralelas que realizan una misma tarea, este conjunto de máquinas se le llama etapas, en este caso los trabajos deben de ser procesados en cada una de las etapas, más no necesariamente en las mismas máquinas.
- **Job Shop:** (Jm) Se cuenta con un conjunto de máquinas y trabajos, donde los trabajos no son necesariamente iguales entre si, por lo que no existe una única ruta de operación, sino que cada trabajo se procesará en máquinas diferentes, incluso pasando varias veces por una misma máquina.
- **Flexible Job Shop:** (FJc) Es una generalización del modelo anterior, donde se cuenta con máquinas paralelas que realizan una misma tarea, a este conjunto de máquinas se les llama estaciones, por lo que cada trabajo va a pasar por distintas estaciones.
- **Open Shop:** (Om) Se cuenta con un conjunto de máquinas y trabajos, donde los trabajos deben de ser procesados en cada una de las máquinas, sin embargo el tiempo de procesamiento puede ser cero en algunas tareas y no hay restricciones respecto a la secuencia de operaciones.

En cuanto al segundo cambio β , este describe las características y restricciones del proceso, puede tener una o varias entradas que pueden ser las siguientes:

- **Interrupciones:** ($prmp$) En inglés "preemption", esto implica que no es necesario mantener un trabajo en la máquina hasta que sea completado, es decir, el trabajo puede ser interrumpido en cualquier momento, usar la máquina para otra tarea y después continuar justo en la etapa donde se interrumpió.

- **Restricciones de precedencia:** (*prec*) Indican que uno o varios trabajos deben ser completados antes de realizar otros.
- **Tiempo de preparación dependiente de la secuencia:** (s_{jk}) Esta restricción indica que si el trabajo j ha finalizado en cierta máquina y a continuación se procesará el trabajo k , es necesario un tiempo s_{jk} para preparar la máquina, de no ser usado se considera que el tiempo es 0 lo que implica que no hay necesidad de preparar la máquina o el tiempo de preparación no depende de la secuencia.
- **Familias de trabajos:** (*fmls*) Los n trabajos pertenecen a F familias distintas de trabajos, donde cada uno puede tener distintos tiempos de procesamiento, pero ser procesados en una misma máquina sin necesidad de prepararla a menos que se realice un cambio de familia.
- **Procesamiento de lotes:** (*batch(b)*) Una máquina puede procesar simultáneamente una cantidad b de trabajos, a esto se le llama lote o "batch".^{en} inglés. El tiempo de procesamiento puede no ser el mismo para cada trabajo y se considera que han finalizado hasta que todos los trabajos del lote estén listos.
- **Permutación:** (*prmu*) Esta restricción es usada acorde con la regla de despacho FIFO, en el que el orden (permutación) de procesamiento de las tareas permanece en todo el sistema.
- **Bloqueo:** (*block*) Usamos esta restricción cuando no es posible procesar más trabajos debido a que se han acumulado trabajos terminados anteriores, por tanto el trabajo recién procesado debe permanecer en la máquina bloqueada hasta que haya espacio para procesar más.
- **No esperas:** (*nwt*) Generalmente ocurre en sistemas flow shop, donde la tarea pasa a través del sistema sin interrupciones, lo que implica que posiblemente sea necesario mantener máquinas sin operar en espera de la llegada del trabajo.

- **Recirculación:** (r_{cr}) Ocurre cuando un trabajo visita más de una vez una misma máquina.

Finalmente el campo de objetivos γ nos indica la función objetivo, aunque pueden considerarse más de uno; cuando se busca minimizar el tiempo requerido para completar los trabajos las variables van a corresponder a los tiempos de completamiento: el tiempo de completamiento de la tarea j en la máquina i C_{ij} , el tiempo de salida de la tarea j del sistema C_j . Si el objetivo está relacionado a las fechas de entrega podemos usar las variables de retraso L_j definida como la diferencia entre el tiempo de completamiento de la tarea j y su fecha compromiso; de manera similar tenemos la tardanza T_j , la cuál se calcula de la misma manera, a diferencia que no toma valores negativos, por lo que estos son sustituidos por 0. Ya con estas variables podemos ver los objetivos más comunes:

- **Makespan:** (C_{max}) Se define como el máximo tiempo de completamiento, es decir el tiempo de completamiento del último trabajo en salir del sistema.
- **Retrazo máximo:** (L_{max}) Corresponde al máximo retraso de las tareas, es decir la mayor violación de las fechas compromiso.
- **Tiempo de completamiento ponderado:** ($\sum w_j C_j$) Nos indica el costo total de procesamiento o almacenamiento de los trabajos a procesar.
- **Tardanza total ponderada:** ($\sum w_j T_j$) Función objetivo de costos más general que la anterior.

2.5 JOB SHOP

Como se mencionó anteriormente, el modelo de job shop scheduling es utilizado cuando las rutas de tareas para cada trabajo están fijas, pero no todas las máquinas

son necesariamente usadas en para cada trabajo, si no que cada trabajo va a tener su propia ruta de maquinarias. La versión flexible de este modelo se diferencia por tener máquinas en paralelo en cada estación de trabajo las cuales realizan la misma tarea. (?)

La descripción y formulación clásica para el modelo determinista de Job Shop Scheduling con el objetivo de minimizar el makespan el siguiente:

Se cuenta con un conjunto M de maquinas disponibles para realizar N trabajos, cada uno de ellos esta compuesto por o_{ij} tareas que deben de realizarse en la máquina m . Se desea encontrar una secuencia de operaciones para cada máquina que minimize el tiempo total de procesamiento de las tareas.

Conjuntos

N Conjunto de tareas j en máquina i denotado por (i, j)

A Conjunto de secuencias de operación para trabajo j denotado por $(i, j) \rightarrow (k, j)$.

Parametros

p_{ij} Tiempo de procesamiento de trabajo j en máquina i .

C_j Tiempo en el cual el trabajo j es completado.

C_{max} Es el valor máximo de los C_j .

Variables

y_{ij} Tiempo en el que iniciará la tarea j en máquina i .

Función Objetivo

Min C_{max}

Minimizar el tiempo de finalización de la última tarea.

Restricciones

$$y_{kj} - y_{ij} \geq p_{ij} \forall (i, j) \rightarrow (k, j) \in A \quad (2.1)$$

$$C_{max} - y_{ij} \geq p_{ij} \forall (i, j) \in N \quad (2.2)$$

$$y_{ij} - y_{il} \geq p_{il} \vee y_{il} - y_{ij} \geq p_{ij} \forall (i, l) \text{ y } (i, j), i = 1 \dots m \quad (2.3)$$

$$y_{ij} \geq 0 \forall (i, j) \in N \quad (2.4)$$

La restricción (1) corresponde a que no se puede realizar la operación j en máquina k hasta que termine su operación en maquina i . De manera similar, la restricción (2) denota que el tiempo de finalización de todos los trabajos es mayor al tiempo de procesamiento de cada operacion. La tercer restricción indica que solo se puede realizar una tarea a la vez en cada máquina. Finalmente tenemos la restricción de no negatividad.

Es posible representar el modelo anterior en un grafo donde los nodos correspondan a las operaciones (i, j) en N y los arcos la secuencia de operacion para cada tarea. El cual puede resolverse por métodos tradicionales de Branch and Bound, se debe tener en cuenta que el problema es de categoria NP-Completo e incrementa exponencialmente su su tiempo de solución en función de las máquinas a utilizar, por lo que se han hecho numerosas investigaciones en métodos heurísticos para su solución, los cuales serán revisados en secciones posteriores.

El estudio de scheduling aplicado en el modelo Job Shop se ha mantenido relevante desde hace más de cinco décadas, desde que Garey et al demostraron en 1976 que este problema, junto con el Flow Shop, pertenecen a la clase NP-Completa (8) se han realizado una gran cantidad de investigaciones en torno a las heurísticas de

solución y variaciones del problema.

Diversos modelos deterministas han sido desarrollados para atender el problema, investigaciones como la de Salido et al consideran un modelo biobjetivo el cual busca minimizar tanto el makespan como el consumo energético, recordemos que la rapidez de operación es inversamente proporcional al gasto energético; su investigación se enfoca en generar un modelo de schedule robusto, capaz de absorber retrasos por situaciones inesperadas para después volver a la programación original (9). Liu et al plantearon la minimización de makespan mediante el uso combinado de cuatro restricciones de amortiguamiento para abordar el problema, el término de amortiguamiento corresponde a tener material almacenado disponible para completar pedidos, estas restricciones corresponden a trabajos sin espera, sin amortiguamiento, amortiguamiento limitado y amortiguamiento ilimitado (10). Este planteamiento fue muy similar al tomado por Beemsterboer et al, quienes indican que la fabricación tiene mayor prioridad de que el almacenamiento, pero esto no siempre resulta optimo (11). Los modelos multiobjetivo de este problema tambien son relevantes, una investigación reciente fue la llevada a cabo por Caldeira et al. (36) quienes consideraban la minimización del makespan, consumo de energía y estabilidad del secuenciamiento ante perturbaciones.

El desarrollo de algoritmos novedosos ha sido objeto de estudio de gran interés para la solución del problema. Algoritmos de evolución diferencial son usados por Yu et al con el objetivo de minimizar el makespan en un proceso de Flexible Job Shop usando las reglas de prioridad clásicas (12). Froehlich et al usaron algoritmos genéticos para mejorar iterativamente las reglas de prioridad con el fin de minimizar la suma ponderada de los trabajos tardíos (13). Otro caso de metaheurísticas para la solución del problema es el uso de algoritmos de enjambre de partículas como el usado por Nouri et al, el cual combinado con multiagentes de objetivos particulares, buscan de manera conjunta la minimización del tiempo requerido para completar

los trabajos (14). Más recientemente, Chen et al (40) desarrollaron un algoritmo genético con autoaprendizaje, lo que mostró un gran desempeño en la solución del problema de Flexible Job Shop.

En cuanto a la consideración de incertidumbre en el problema, encontramos diversas formas de abordarlo, como el estudio de Gao et al, quienes plantean el uso de algoritmos de colonia de abejas considerando números difusos triangulares para describir la incertidumbre en los tiempos de procesamiento, a la vez que consideran la incorporación de nuevos trabajos en el proceso con el fin de minimizar el makespan (15). Por otro lado, Kurunakaran et al usaron algoritmos genéticos para resolver el problema, la incertidumbre fue considerada en este caso por medio de distribuciones Gamma de probabilidad para describir los tiempos de operación con el fin de minimizar el tiempo total de procesamiento (16). Como ultimo ejemplo está el de Ahmed et al, en su estudio consideraron la incertidumbre en las reglas de prioridad utilizando lógica difusa y comparándolas con las reglas de prioridad tradicionales, lo cual les permitió encontrar mejores resultados (17).

2.5.1 REGLAS DE PRIORIDAD

Las reglas de prioridad o despachamiento son parámetros que nos permiten seleccionar las tareas a realizar a continuación en función de distintas características, objetivos o consideraciones.

Podemos clasificar las reglas de prioridad de diversas maneras: tenemos la diferencia entre reglas estáticas y dinámicas, donde las primeras no cambian respecto al tiempo, mientras que las otras se ven modificadas conforme se avanza en la secuencia de operación. Otra manera de clasificarlas es respecto a la información en la que se basan, teniendo reglas locales donde la información repercute en la fila de la

máquina donde se va a procesar a continuación, a diferencia de las reglas globales que su información abarca diversas máquinas en el sistema. Algunas de las reglas más usadas para ambiente Job Shop son las siguientes:

- **SPT**: Shortest Processing Time first
- **LPT**: Longest processing time first
- **WSPT**: Weighted Shortest Processing Time first
- **EDD**: Earliest Due Date

Las reglas de prioridad compuestas son parámetros que combinan diversas reglas elementales, las cuales son funciones de atributos de las máquinas o trabajos: velocidades y tiempos de procesamiento, fechas compromiso, trabajos en espera, etc). El efecto que tendrá cada atributo en la prioridad global del trabajo va a depender de las reglas elementales usadas así como del parámetro de escalamiento. Cada regla elemental tendrá un escalamiento en la regla compuesta, este puede ser fijo o variable en el tiempo; los parámetros deben ser determinado por quien diseña la regla y aunque la experiencia es importante, la simulación computacional es de gran ayuda.

2.6 OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

La optimización multiobjetivo involucra más de una función objetivo ya sea en minimización o maximización. A diferencia de la optimización monoobjetivo, donde generalmente se encuentra una única solución al problema la cual es fácilmente comparable con otras soluciones; en este caso se busca un conjunto de soluciones que compensan los distintos objetivos, se conoce como solución de compromiso.

El modelo matemático general es el siguiente (?):

$$”min”(f_1(x), \dots, f_p(x))$$

$$Ax \leq b$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

Donde A es una matriz de $m \times n$, b un vector de m columnas, x un vector de n dimensiones compuesto de variables reales, y finalmente f un vector de p funciones objetivo.

Llamamos a $X = \{x \in \mathbb{R}^n : Ax \leq b\}$ conjunto factible, y $x \in X$ es una solución factible. Al conjunto $Y = f(X) = \{y \in \mathbb{R}^p : x \in X\}$ lo llamamos conjunto factible del espacio de objetivos, y $y \in Y$ es un vector asociado a una solución factible.

Al considerar diversas funciones objetivo es necesario aclarar el sentido de optimalidad que tiene el contexto del problema, es decir, hay distintas definiciones de optimalidad que dependen de la necesidad del problema. Esto se relaciona con los diversos conceptos de dominancia, la cual nos indica la calidad de la solución, ya sea que ciertos objetivos tengan mayor importancia que otros o no. De esta manera la optimalidad de algún problema dependerá del sentido de dominancia considerado.

(?) Cuando ningún objetivo es más importante que otro la optimalidad está dada por el principio de optimalidad de Pareto, el cual indica que una solución del problema multicriterio es eficiente si al intentar mejorar cualquiera de sus funciones objetivo se degrada el valor de otra función. Es decir que una solución x^* es eficiente si no existe otra x' tal que $f(x') \leq f(x^*)$ y para algún componente (función objetivo) i tenemos $f_i(x') < f_i(x^*)$, este conjunto de soluciones eficientes se denota como X_E . El conjunto de puntos correspondiente a las soluciones eficientes se le denomina conjunto de puntos no dominados, se denotan como $Y_N = f(X_E)$.

Podemos acotar la búsqueda de puntos no dominados con los puntos ideal y^I y nadir y^N , lo cuales otorgan cotas inferiores y superiores respectivamente. Si bien el punto ideal es fácil de calcular obteniendo los mínimos individuales de cada función, el punto nadir es bastante más complicado y no se cuenta con métodos eficientes para su cálculo en problemas de más de dos funciones objetivo. El proceso de toma de decisiones con multiples objetivos es significativamente complejo, la selección de portafolio de clientes o el secuenciamiento de operaciones bajo requerimientos de clientes, multiples máquinas u operaciones requiere mucha más atención que sus versiones mono objetivo (33) (34) (35)

2.7 SCHEDULING MULTIOBJETIVO

En la búsqueda de desarrollar modelos matemáticos más reales, diversas investigaciones se han enfocado en la optimización multiobjetivo para atender el problema de Job Shop. Si bien en la sección anterior se mencionó en varias ocasiones el término multiobjetivo o multicriterio, las investigaciones propuestas no presentaban una metodología propia de esta rama, si no que consideraban problemas con una sola función objetivo compuesta por varios criterios, trabajandose como un modelo de programación lineal o entera mixta tradicional.

Las investigaciones están caracterizadas objetivos que entran en conflicto. Zhan et al desarrollaron un algoritmo genético el cuál busca la minimización del tiempo de operación y del consumo energético con soluciones óptimas de Pareto a partir de la solución de dos problemas (28). Lu et al abordaron un problema similar controlando los tiempos de procesamiento, lo cual conlleva un mayor manejo de recursos ante distintas situaciones, esto se desarrollo con un algoritmo de virus discreto donde se optimizan a la par la minimización de recursos empleados y el makespan (30). Posteriormente este mismo equipo de investigacion desarrolló una metodología mul-

tiobjetivo en la optimización de la programación de operaciones en la industria de la soldadura, la investigación trata el scheduling dinamico, velocidades de operación variables, la integración de tiempos de operación y transporte, etc; utilizando un algoritmo de lobo gris buscan minimizar el makespan, la carga de maquinas y la inestabilidad ante cambios de programación (31). Ahmadi et al desarrollan un algoritmo evolutivo para un resolver un problema de shceduling robusto al optimizar simultaneamente el makespan y la estabilidad de la programación de operaciones, es decir, la capacidad de que el proceso se reponga ante interrupciones inesperadas, en este caso paros de máquina (29).

2.8 SCHEDULING EN MANUFACTURA ADITIVA

Las investigaciones referentes a la optimización de planeación y programación de operaciones de manufactura aditiva son relativamente recientes, anteriormente los temas de optimización para este proceso se enfocaban más en métodos de impresión o algoritmos que minimizan el tiempo de operación, como por ejemplo desarrollar un recorrido óptimo del cabezal de impresión durante la operación (18). Uno de los primeros trabajos que considera propiamente la planeación con esta tecnología fue el presentado por Zhu et al en 2013, en el se desarrolla un algoritmo para planear los procesos correspondientes a la fabricación de piezas de alta complejidad tanto con manufactura aditiva como destructiva y su inspección (19). En una línea muy similar Baumung et al en 2018 presentaron un proceso optimizado para la planeación y control de la planeación de producción en un ambiente de manufactura aditiva. (32).

Si bien las investigaciones anteriores presenta un algoritmo que ayuda considerablemente, no toma a consideración todas las restricciones que conllevan los procesos de manufactura aditiva. (39) El problema de planeación, scheduling y animado para este proceso fue meramente introducido por primera vez en 2017 por

Li et al, quienes presentan dos heurísticas con reglas de decisión con el objetivo de minimizar el costo promedio de producción por volumen de material en un proceso de lecho en polvo (20). A partir de entonces se han realizado diversos estudios referentes al tema, los cuales consideran objetivos similares, por ejemplo Fera et al presentaron un algoritmo genético de optimización multiobjetivo con el fin de minimizar el tiempo y costo de producción considerando el uso de una sola máquina y restricciones de volumen (21). El mismo equipo de investigación presentó un estudio similar dos años después, usando las mismas consideraciones, aunque en esta ocasión usando una heurística de búsqueda tabú, la cuál dio mejores resultados, aunque tardaba más en encontrar soluciones (22).

Otras investigaciones consideran el uso de múltiples máquinas paralelas, esto fue investigado por Chergui et al, en su trabajo utilizan la regla de prioridad de fecha de entrega más próxima y realizan una estimación de tiempo de fabricación. El problema es dividido en dos subproblemas, el primero de ellos busca como asignar las distintas tareas del problema por medio del anidamiento y resolviendo usando programación binaria entera cuadrática. El segundo problema corresponde al secuenciamiento de operaciones, resolviendolo con programación entera mixta (23). Dvorak et al abordaron el subproblema de anidamiento usando teoría de grafos y buscando cliques que correspondan a piezas equivalentes para su procesamiento en conjunto, las piezas seleccionadas después se van agregando a la máquina con un algoritmo de anidamiento (24).

Otros aspectos estudiados incluye la aceptación o rechazo de pedidos para manufactura aditiva como el presentado por Li et al, donde su algoritmo apoya en la toma de esta decisión con base en la disponibilidad de tiempo mientras que maximiza la utilidad neta por unidad de tiempo en el proceso (25). O tambien se estudia el efecto de la orientación y ubicación de piezas dentro de la máquina en el scheduling, esto fue publicado por Zhan et al quienes integraron estas consideraciones en su

algoritmo evolutivo para mejorar sus resultados (26). Por Por ultimo se presentan casos de estudio en los que se trabaja con procesos en distintas configuraciones: unica máquina, máquinas paralelas idénticas o diferentes, esto fue abordado por Kucuk-koc quien resolvió estas consideraciones con programación entera mixta buscando la optimización de diversas medidas de tiempo en el proceso (27).

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y METODOLOGÍA

Para este estudio se desarrollará una metodología de apoyo a la toma de decisiones para el proceso de planeación y secuenciamiento de operaciones en manufactura aditiva.

3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN

El siguiente diagrama describe el proceso de fabricación desde la llegada de algún pedido hasta su fabricación.

1. **Venta:** El cliente elige las piezas requeridas, se establece un precio de venta, nivel de importancia y una fecha límite de entrega.
2. **Diseño:** En caso de ser requerido se realiza un diseño computarizado de la pieza a fabricar, el tiempo requerido para esta operación depende de si es un diseño nuevo, un cambio de medidas en diseños ya realizados, y en la complejidad de la pieza, esta parte del proceso se realiza en una estación de trabajo con

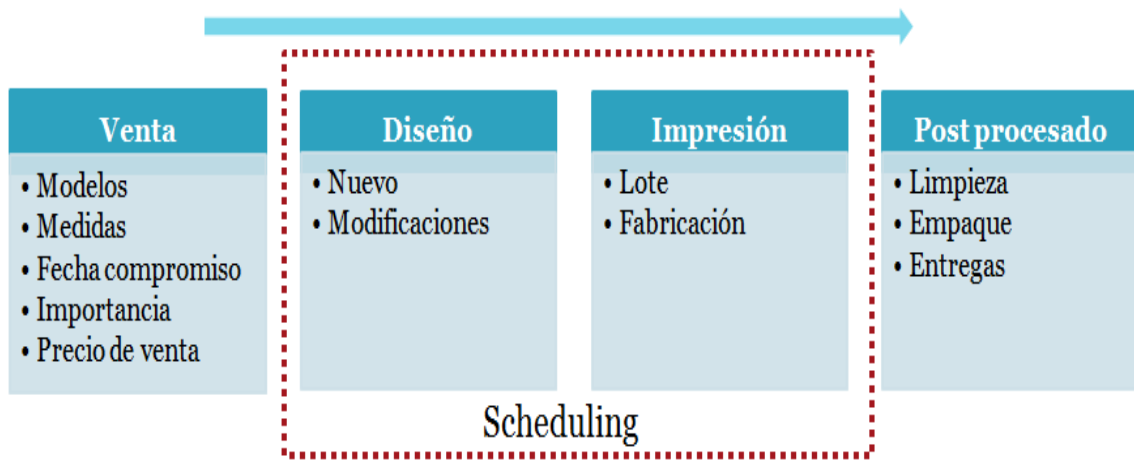


FIGURA 3.1: Proceso fabricacion.

varias máquinas paralelas; cada diseño es asignado a una de estas máquinas. En cada máquina se trabaja en un solo diseño a la vez y su proceso puede ser interrumpido en cualquier momento para ser reanudado posteriormente en el mismo punto.

3. **Impresión:** Los modelos computarizados son enviados a la estación de fabricación, la cual cuenta con una o varias máquinas de impresión paralelas, las cuales pueden variar en cuanto a su velocidad de trabajo, tiempo de arranque y área de trabajo; este último parámetro define el máximo de piezas que pueden ser fabricadas a la vez. Los diseños asignados, llamado lotes, son cargados a la máquina de impresión correspondiente para realizar su fabricación. Una vez que la impresión de las piezas es iniciada esta no se puede detener hasta ser completada. Si se requiere hacer alguna corrección, o la impresión termina con algún defecto la pieza debe ser fabricada completamente de nuevo.
4. **Postprocesamiento:** Las piezas fabricadas son pulidas y llevadas a otra estación de trabajo o a un área de espera hasta ser empacadas con el resto de piezas correspondientes al pedido.

Las etapas de diseño y fabricación son las más críticas en cuanto al tiempo de fabricación de los pedidos. Por tanto es de vital importancia optimizar la secuencia

de operación permitiendo que se cumplan los tiempos de entrega para todos los casos, además de maximizar las ganancias.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANEACIÓN Y SECUENCIAMIENTO

Se puede considerar el proceso como un ambiente híbrido de flowshop y jobshop donde también se trabaja con el procesamiento de lotes. El secuenciamiento se realiza de manera dinámica, ya que la cantidad de pedidos y sus características varía respecto al tiempo y además tienen un impacto en la secuencia actual de trabajo, por lo que se generan continuamente nuevos secuenciamientos o se modifican los ya generados, ante esto se considera una estrategia de replaneación híbrida que genera soluciones de manera cíclica cada determinado tiempo y al ocurrir algún evento que afecte en la secuencia, ya sea por la llegada de ordenes nuevas de alta urgencia o de clientes prioritarios.

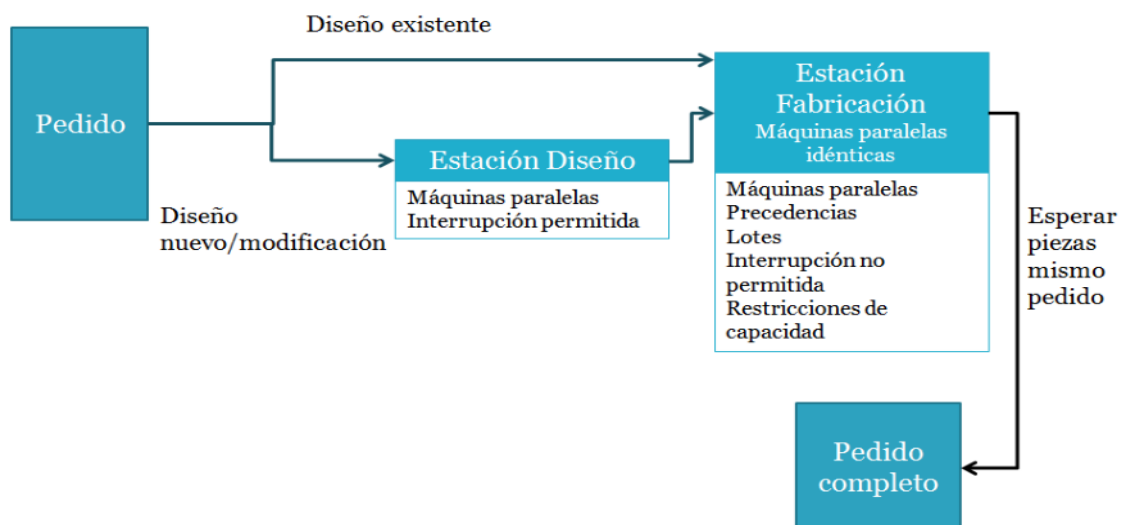


FIGURA 3.2: Proceso secuenciamiento inicial.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO

3.2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE PEDIDOS

- **Pedido:** conjunto de piezas solicitadas por el cliente.
- **Fecha compromiso:** fecha acordada entre cliente y empresa para realizar la entrega de la orden.
- **Importancia:** nivel cualitativo del beneficio por atender al cliente u orden en cuestión, ya sea por su reconocimiento en el mercado, posibles ventas a futuro, nivel de urgencia etc.
- **Ganancia:** beneficio económico por completar la orden.
- **Piezas:** conjunto de operaciones a realizar en las estaciones de trabajo, una vez que todas estén realizadas se considera que la orden está lista.
 - Tamaño: medida nominal de la pieza.
 - Tipo: uso que se le dará a la pieza.
 - Tiempo de diseño: tiempo requerido para generar el modelo computarizado de la pieza, depende meramente del tipo de pieza.
 - Tiempo de impresión: tiempo requerido para fabricar la pieza de manera individual, depende del tamaño y tipo de pieza.
 - Área: espacio que ocupa la pieza en el espacio de fabricación de cada máquina.

3.2.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES DE TRABAJO

- **Orden:** subconjunto de todas las piezas de pedidos, las cuales se procesarán en el periodo determinado .

- **Periodo:** tiempo determinado en el que se realizará la secuencia de operaciones.
- **Estación de diseño:** Primer operación en el proceso, en un conjunto de máquinas paralelas.
- **Estación de fabricación:** Segunda operación en el proceso, es un conjunto de impresoras 3D paralelas.
 - Área de impresión: espacio disponible para colocar piezas dentro de una impresora 3D, varia dependiendo de la máquina.
 - Lote: conjunto de piezas que se fabricarán al mismo tiempo en una misma impresora 3D.

3.3 RETOS A LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de toma de decisión es significativamente complejo en la planeación y secuenciamiento de operaciones, esto debido a la cantidad de piezas a trabajar, máquinas y necesidades del cliente. Entre los retos particulares se encuentran:

- Retrasos en fechas compromiso debido a una estimación errónea en los tiempos de fabricación.
- Inactividad en máquinas por falta de diseños debido a una mala planeación.
- Retrasos ante eventos no esperados como pedidos urgentes o fallas en piezas.
- Falta de atención a clientes importantes.
- Flujo lento de pedidos finalizados.
- Inclusión de pedidos urgentes no planificados con anterioridad.

El proceso de toma de decisiones actual se sintetiza en la siguiente imagen. El proceso consiste en dos fases, (i) durante la fase de venta se establecen las características del pedido y una fecha compromiso de entrega, la cual depende también de los pedidos ya en proceso. Una vez aprobado el pedido por el cliente, este pasa a (ii) la fase de planeación, donde se establece la prioridad del pedido; esto depende de la fecha acordada, la importancia que tiene el cliente y que tan rápido puede ser procesado. Posteriormente el pedido es asignado a una secuencia la cual depende de las piezas ya programadas, así como la disponibilidad en máquinas.

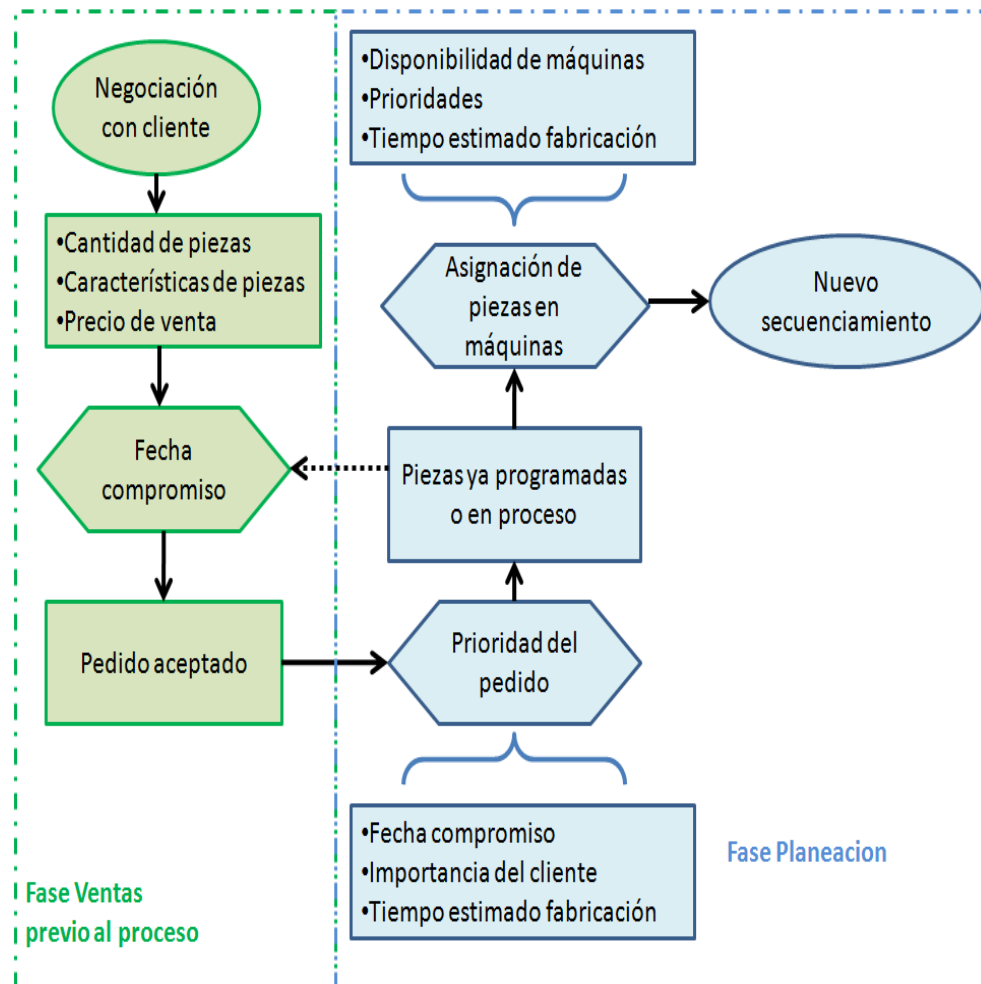


FIGURA 3.3: Toma decisiones actual.

3.4 METODOLOGÍA PROPUESTA

Se presenta una metodología de planeación y secuenciamiento de operaciones. La siguiente figura condensa la metodología.

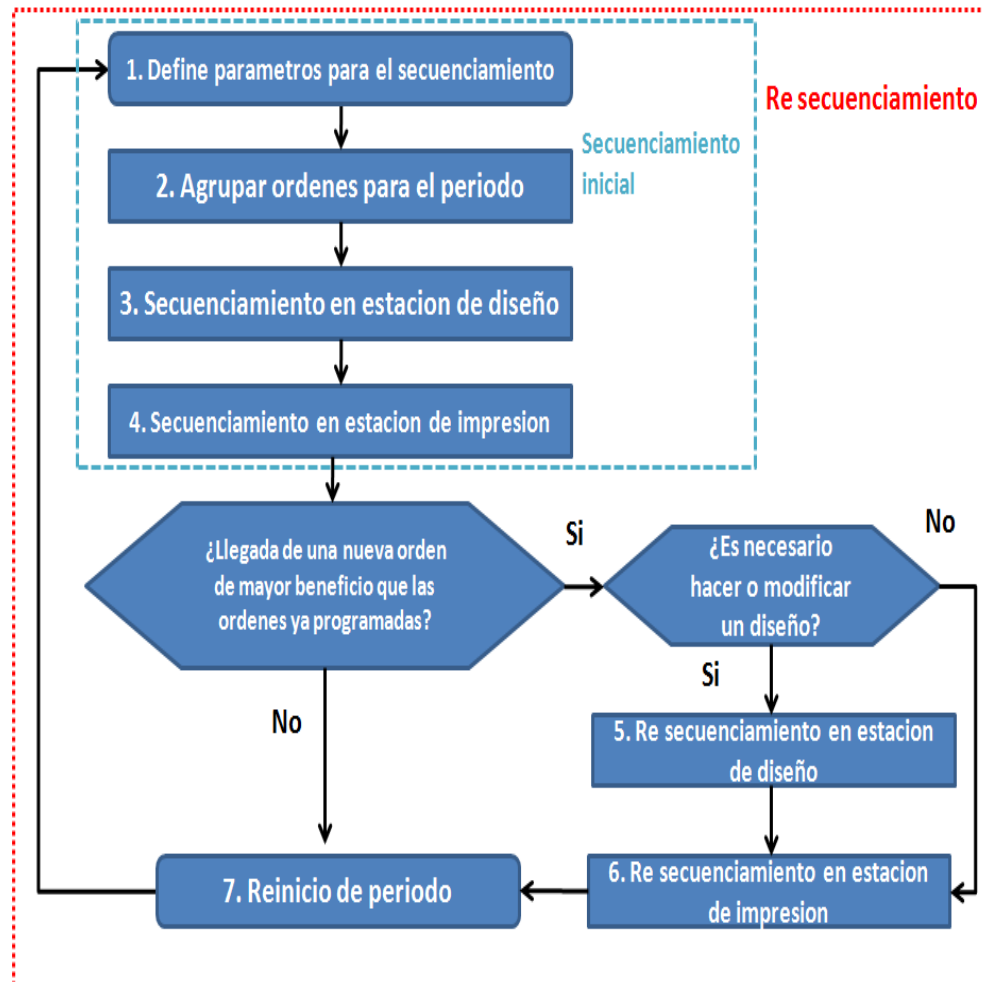


FIGURA 3.4: Proceso secuenciamiento.

Se enlista el proceso propuesto para el secuenciamiento de operaciones.

1. Definir o calcular parámetros importantes para el secuenciamiento:

- a) Definir duración del periodo.

- b) Calcular tiempo disponible para cada estación.
- c) Asignar prioridad a órdenes en función de los criterios y definir una prioridad para cada una.

2. Agrupar órdenes en lote de fabricación:

- a) El lote inicial es creado. Cada lote es enumerado y agregado a una cola de procesamiento en orden ascendente (para dos lotes a y b se procesa primero el que tenga menor número).
- b) Se añaden las ordenes de cliente en orden descendente de prioridad a los lotes hasta que no hay tiempo disponible en ninguna estacion de diseño o impresion.
- c) Si no es posible añadir más ordenes a un lote, se crea un nuevo lote y las ordenes siguientes son agregadas a este en la medida de lo posible.
- d) Ante la llegada de una nueva orden de más alta prioridad que la ultima orden ya en los lotes definidos, se realiza un resecuenciamiento para ese lote y los demás por procesar después de este.

3. Secuencia inicial diseño: Asignar piezas a las máquinas de diseño buscando minimizar el tiempo de completamiento estimado de las piezas (considerando el tiempo estimado de fabricación), maximizar ganancia y maximizar importancia. Con esto obtenemos los tiempos de liberación de diseños, es decir, a partir de qué momento puedo empezar a fabricar la pieza.

4. Secuencia inicial impresión: Asignar piezas o conjuntos de éstas a las máquinas de impresión, minimizar el tiempo de fabricación (considerando tiempo “real” de fabricación, agrupamiento de piezas, tiempos de liberación de diseños y tiempo de setup), maximizar ganancia e maximizar importancia.

5. Re-secuenciamiento diseño: En caso de que llegue una orden urgente que requiera diseño, se vuelve a realizar el secuenciamiento considerando solamente

las piezas que aún siguen en la cola de diseño (las no diseñadas aun) y las urgentes. Tiene las mismas consideraciones que el paso 2. En este caso el proceso en turno puede ser detenido y continúa en el mismo punto más adelante, es decir que el tiempo de diseño faltante es la diferencia entre el total y lo que se avanzó hasta el momento.

6. **Re-secuenciamiento impresión:** Similar al paso anterior, se trabaja con la orden urgente y las piezas aún en cola de impresión. Tiene las mismas consideraciones que el paso 3. Por la naturaleza de la impresión no es posible detener el trabajo en proceso y continuarlo posteriormente, es necesario esperar a que termine o detenerlo e iniciar desde el principio. Este paso afecta ya que para continuar en la cola de impresión es necesario esperar la liberación de máquinas.
7. **Reinicio de periodo:** el proceso se repite desde el paso 1 con las órdenes pendientes y las nuevas.

3.5 MODELO MATEMÁTICO PARA SECUENCIAMIENTO

A continuación se describe el modelo matemático de programación entera multiobjetivo utilizado para el proceso de secuenciamiento.

3.5.1 CONSIDERACIONES

- El tiempo de diseño de piezas es conocido.
- El tiempo de impresión solo es conocido una vez que la pieza es diseñada, para resolver el problema de secuenciamiento en la fase de diseño se considera un tiempo estimado en función de las características de la pieza. Una vez que la pieza sale de esta fase se utiliza otro tiempo para la base de impresión.

- Las impresoras trabajan a una misma velocidad, sin embargo pueden tener distintos tiempos de preparación y áreas de trabajo.

3.5.2 CONJUNTOS

- I : conjunto de ordenes i recibidas.
- S : orden de trabajo para el periodo, es un subconjunto de ordenes i .
- J_i : conjunto de piezas j pertenecientes al pedido i .
- M : conjunto de máquinas m de manufactura aditiva disponibles para fabricación, con un total de n_m piezas.
- D : conjunto de máquinas de diseño d disponibles, con un total de n_d piezas
- B conjunto de lotes b que contiene las piezas a procesar en una máquina al mismo tiempo.
- Q : conjunto de objetivos q .
- W : conjunto de ponderaciones w para cada objetivo q .
- R : conjunto de reglas de prioridad r .
- Wr : conjunto de ponderaciones wr para cada regla r .
- P : conjunto de soluciones eficientes.

3.5.3 PARÁMETROS

3.5.3.1 PEDIDOS

- dd_i : fecha compromiso del pedido i .

- g_i : ganancia del pedido i .
- pr_i : nivel de importancia del pedido i (corresponde a la prioridad asignada por el tomador de decisiones).

3.5.3.2 PIEZAS

- a_{ij} : área de pieza j del pedido i .
- td_{ij} : tiempo de diseño de pieza j del pedido i .
- te_{ij} : tiempo de impresión estimado de pieza j del pedido i .
- tm_{ij} : tiempo de impresión real de pieza j del pedido i .

3.5.3.3 MÁQUINAS DE IMPRESIÓN

- A_m : área total de trabajo de impresora m .
- st_m : tiempo de arranque de impresora m , es independiente de la secuencia.

3.5.3.4 PROCESO

- T : duración del periodo.
- N : total de piezas a fabricar en el periodo, corresponde a la cardinalidad de $(i, j) \in S$.
- k : indica la posición de una pieza en la secuencia de diseño, va de 1 hasta N .
- b : indica la posición de una pieza en la secuencia de impresión, va de 1 hasta N .

3.5.4 VARIABLES DE DECISIÓN

3.5.4.1 ESTACIÓN DE DISEÑO

- $x_{ij}^{kd} \begin{cases} 1 & \text{si se diseña la pieza } j \text{ del pedido } i \text{ en la posición } k \text{ de la máquina } d. \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$
- tb_{kd} : tiempo de inicio del diseño en posición k de la máquina d .
- Cd_{ij} : tiempo de completamiento del diseño de la pieza j del pedido i .
- rd_d : tiempo de liberacion de máquina de diseño d .
- rl_{ij} : tiempo de liberacion de pieza ij para poder ser procesada en estación de diseño.

3.5.4.2 ESTACIÓN DE IMPRESIÓN

- $x_{ij}^{bm} \begin{cases} 1 & \text{si la pieza } j \text{ del pedido } i \text{ es agregada al lote } b \text{ de la máquina de impresión } m \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$
- $yp_{bm} \begin{cases} 1 & \text{si el lote } b \text{ en la máquina } m \text{ es usado} \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$
- $y_i \begin{cases} 1 & \text{si se estima que el pedido } i \text{ se completa en el periodo.} \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$
- tp_{bm} : tiempo estimado de inicio de fabricación del lote b en la máquina m .
- tc_{bm} : tiempo estimado de duración de fabricación del lote b en la máquina m .
- Cb_{bm} : tiempo estimado de completamiento de fabricación del lote b en máquina m .
- C_i : tiempo estimado de completamiento de fabricación del pedido i .
- C_{max} : tiempo estimado de completamiento de todos los pedidos.

3.5.5 CRITERIOS A OPTIMIZAR

En este caso se consideran tres criterios para la toma de decisiones en el secuenciamiento de operaciones

- **Maximizar ganancia:** se secuencian primero las piezas con mayor utilidad

$$f_1 = \max \sum_{i \in S} g_i y_i \quad (3.1)$$

- **Maximizar prioridades:** se secuencian primero las piezas importantes.

$$f_2 = \max \sum_{i \in S} \frac{pr_i}{dd_i} y_i \quad (3.2)$$

- **Minimizar tiempos:** terminar todos los órdenes lo más pronto posible, relacionado a un uso eficiente de las máquinas.

$$f_3 = \min C_{max} \quad (3.3)$$

3.5.6 RESTRICCIONES

3.5.6.1 ESTACIÓN DE DISEÑO

$$\sum_k \sum_d x d_{ij}^{kd} = 1, \forall (ij) \in S. \quad (3.4)$$

$$\sum_{(ij)} \sum_d x d_{ij}^{kd} \leq |D|, \quad k = 1, \dots, N. \quad (3.5)$$

$$\sum_{(ij)} x d_{ij}^{kd} \leq 1, \quad k = 1, \dots, N \quad \forall d \in D \quad (3.6)$$

$$tb_{kd} = \sum_{(ij)} t d_{ij} x d_{ij}^{kd} + tb_{k-1d}, \quad k = 1, \dots, N \quad \forall d \in D \quad (3.7)$$

$$C d_{ij} \geq tb_{kd} - \Psi(1 - x d_{ij}^{kd}) \quad k = 1, \dots, N \quad \forall (ij) \in S, \quad \forall d \in D. \quad (3.8)$$

$$xd_{ij}^{kd} \in [0, 1] \quad tb_{kd}, Cd_{ij} \geq 0 \quad (3.9)$$

La primer restricción 3.4 es de asignación, de manera que cada pieza del total de pedidos solo se fabrique una vez. 3.5 permite que a lo más se fabrique al mismo tiempo una pieza en cada máquina. La restricción 3.6 evita que dos piezas se fabriquen al mismo tiempo en la misma máquina de diseño. 3.7 establece que se debe de concluir un diseño antes de iniciar otro. La restricción 3.7 establece el tiempo en el que el diseño de la pieza es liberado para su posterior fabricación. Finalmente 3.9 indica la naturaleza de las variables.

3.5.6.2 ESTACIÓN DE IMPRESIÓN

$$\sum_{b \in B} \sum_{m=1}^{n_m} xp_{ij}^{bm} = 1, \forall (ij) \in S. \quad (3.10)$$

$$yp_{bm} \geq xp_{ij}^{bm}, \quad b = 1, \dots, N \quad \forall (ij) \in S. \quad \forall m \in M. \quad (3.11)$$

$$tc_{bm} = st_m \quad yp_{b,m} + \sum_{(ij) \in S} te_{ij} xp_{ij}^{bm}, \quad b = 1, \dots, N \quad \forall m \in M. \quad (3.12)$$

$$tp_{bm} \geq tp_{b-1m} + tc_{b-1m}, \quad b = 1, \dots, N \quad \forall m \in M. \quad (3.13)$$

$$Cb_{bm} \geq tp_{bm} + tc_{bm}, \quad b = 1, \dots, N \quad \forall m \in M. \quad (3.14)$$

$$tp_{bm} - Cd_{ij} \geq -\Psi (1 - xp_{ij}^{bm}), \quad \forall (ij) \in S. \quad b = 1, \dots, N \quad \forall m \in M. \quad (3.15)$$

$$\Psi (1 - y_i) + dd_i - C_i \geq 0, \quad \forall (ij) \in S. \quad (3.16)$$

$$C_i \geq Cb_{bm} - \Psi (1 - xp_{ij}^{bm}), \quad \forall (ij) \in S. \quad b = 1, \dots, N \quad \forall m \in M. \quad (3.17)$$

$$C_{max} \geq \max\{td_{ij} + te_{ij}\}, \quad \forall (ij) \in S. \quad \forall m \in M. \quad (3.18)$$

$$\sum_{i,j} a_{ij} xp_{ij}^{bm} \leq A_m, \quad b = 1, \dots, N \quad \forall m \in M. \quad (3.19)$$

$$xp_{ij}^{bm}, yp_{bm} \in [0, 1] \quad tp_{bm}, tb_{bm}, Cb_{bm}, C_i \geq 0 \quad (3.20)$$

La restricción 3.10 evita que las piezas sean fabricadas más de una vez, es una restricción de asignación. 3.11 indica el uso del lote b en la máquina m si se coloca al

menos una pieza en él. La ecuación 3.12 calcula el tiempo de fabricación del lote a partir de las piezas que se fabricarán en él.

La restricción 3.13 evita que haya más de una lote en fabricación al mismo tiempo en la misma máquina, por lo que cada lote debe esperar a que el anterior haya terminado. De manera similar, 3.14 calcula el tiempo de completamiento del lote dependiendo del tiempo en el que inicio su fabricación y su tiempo de fabricación.

La restricción 3.15 evita que piezas sean agregadas a algún lote hasta que su diseño ya haya sido finalizado. 3.16 indica si el pedido i se completaría a tiempo. 3.17 calcula el tiempo de completamiento de cada pedido. La restricción 3.18 es una cota dual para la función objetivo 3.3 la cual indica que el tiempo mínimo de procesamiento del periodo es por lo menos el mismo tiempo de fabricación de la pieza con mayor tiempo de procesamiento.

La restricción 3.19 evita que se añadan más piezas de las que puede soportar la impresora en el área de impresión. Finalmente 3.20 indica la naturaleza de las variables.

3.6 AGRUPAMIENTO DE ORDENES PARA EL PERIODO

El siguiente algoritmo realiza el agrupamiento de ordenes de cliente para un periodo de secuenciamiento. Se inicia definiendo las reglas de prioridad a considerar con las que se calcularán los niveles de prioridad para cada una de las órdenes a procesar, posteriormente se realiza una suma ponderada de cada regla de prioridad. El resultado de esta suma es el nivel de importancia de la orden. Las reglas a considerar y el peso de cada una de ellas depende meramente del tomador de decisiones.

Ya que cada orden tiene definido su nivel de importancia, se seleccionan las ordenes que van a ser procesadas para el periodo. Para esto las ordenes se ordenan de manera descendente en función de su importancia, entonces la primer orden, la más importante, es agregada al subconjunto S . Esta orden ahora ocupa una cantidad de tiempo de diseño e impresión estimado del total disponible para las estaciones, por

lo que es necesario actualizar esta disponibilidad. Se van agregando ordenes hasta que ya no haya disponibilidad para ninguna de las estaciones.

El siguiente algoritmo ilustra el procedimiento.

Algorithm 1 Selección de pedidos para periodo.

Require: : $T, S \leftarrow \{\emptyset\}$, ▷ **Preparación**

- 1: Calcular el tiempo disponible de diseño e impresión para el periodo, TD y TM respectivamente.
 - 2: Calcular el tiempo total de diseño e impresión estimado, Dt_i y $Mt_i \forall i \in I$.
 - 3: **for** todo $i \in I$ **do**
 - 4: **for** todo $r \in R$ **do**
 - 5: Calcular la regla de prioridad RA_{ir} .
 - 6: **end for**
 - 7: **end for**
 - 8: Calcular el nivel de importancia de la orden $NI_i = \sum_r wr_r RA_{ir}$
 - 9: Ordenar i de manera descendente en funcion de NI_i
 - 10: **while** $TD \geq 0$ & $TM \geq 0$ **do**
 - 11: $S \leftarrow S \cup i$
 - 12: Se actualizan TD y TM
 - 13: **end while**
 - 14: S : Conjunto de pedidos considerados en el periodo.
-

Las ordenes que no entran al periodo quedan en espera a ser asignadas para otro periodo.

3.6.1 REGLAS CONSIDERADAS

Para esta primera sección se consideraron las siguientes reglas de prioridad para el agrupamiento de las órdenes.

$$RA_{i1} = \frac{g_i}{Dt_i + Mt_i} \quad (3.21)$$

$$RA_{i2} = \frac{pr_i}{dd_i} \quad (3.22)$$

$$RA_{i3} = Dt_i + Mt_i \quad (3.23)$$

La regla de prioridad 3.21 calcula el rendimiento económico de la orden, es decir, prioriza las órdenes con mayor ganancia en menor tiempo. La siguiente regla 3.22 secuencia primero los pedidos con mayor urgencia: alta prioridad y poco tiempo para realizarlos. Finalmente 3.23 esta relacionada a la operación, se les da prioridad primero a los pedidos con mayor tiempo total de fabricación.

3.7 SECUENCIAMIENTO MEDIANTE REGLAS DE PRIORIDAD

Se propone un método de secuenciamiento mediante el uso de reglas de prioridad. El secuenciamiento de las órdenes se va a realizar en función del nivel de importancia calculado, de manera que todas las piezas de la orden de mayor prioridad se procesaran antes de que cualquier pieza de la siguiente orden.

3.7.1 ESTACIÓN DE DISEÑO

Para el secuenciamiento en la estación de diseño primeramente se calculan las reglas de prioridad de cada pieza en las ordenes seleccionadas. Una vez calculado este valor, las piezas de cada orden de cliente se ordenan de manera descendente en función de su nivel de prioridad, esta lista ordenada es la cola de diseño para la estación de impresión. La asignación de piezas para cada máquina de la estación se realiza empezando con la de mayor prioridad ponderada, la cual es colocada en la primer máquina de diseño disponible, la segunda pieza es colocada en la siguiente máquina con disponibilidad y así sucesivamente. Esta metodología es representada en el siguiente algoritmo

Algorithm 2 Secuenciamiento de pedidos en estación de diseño.

Require: : $S, Sp \leftarrow S$

▷ **Preparación**

```

1: for todo  $i \in S$  do
2:   for todo  $j \in J_i$  do
3:     for todo  $r \in R$  do
4:       Calcular la regla de prioridad  $RP_{ijr}$ .
5:       Calcular el nivel de importancia de la pieza  $Nd_{ij} = \sum_r wr_r RP_{jir}$ 
6:     end for
7:   end for
8: end for
9: while  $S \neq \emptyset$  do
10:  Iniciando con la orden  $i$  de manera descendente en función de su prioridad.
11:  Ordenar  $i$  de manera descendente en función de  $Nd_{ij}$ 
12:  Añade pieza  $ji$  a la máquina de diseño disponible: tal que  $rd_d$  sea el tiempo
    más proximo para liberar la máquina.
13:  Se actualiza el tiempo de liberación de la máquina.  $rd_d = rd_d + td_{ij}$ 
14:  Se calcula el tiempo de completamiento estimado de la pieza  $ij$ .  $Cd_{ij} = rd_d$ 
15:  Se elimina la pieza  $ij$  del listado  $S \leftarrow S/ij$ 
16: end while

```

3.7.2 ESTACIÓN DE IMPRESIÓN

Para la generacion de la cola de piezas en la estacion de impresion se toma como base la cola de la estacion de diseño, por lo que las piezas mantienen su misma prioridad. Para la asignacion de piezas en cada máquina, se toma la primer pieza de la cola de impresion y se asigna a la máquina de disponibilidad más inmediata, si aun hay espacio en el área de impresión de la máquina entonces se agregan más piezas a la máquina. En caso contrario las piezas siguientes se agregan a la siguiente máquina con disponibilidad más inmediata. El algoritmo siguiente representa la metodología.

Algorithm 3 Secuenciamiento de piezas en estación de impresión.

Require: : Sp,

▷ **Preparación**

- 1: **while** $S \neq \emptyset$ **do**
 - 2: Seleccionar la impresora m con disponibilidad más próxima. Setear $A'_m = A_m$
y $tc=0$
 - 3: Añadir pieza ij con mayor prioridad
 - 4: Actualizar área disponible de impresion. $A'_m = A'_m - a_{ij}$
 - 5: Actualiza tiempo de duración del lote de impresion. $tc_m = st_m + tm_{ij}$
 - 6: Actualiza tiempo de completamiento del lote de impresion. $rd_m = rd_m + tc_m$
 - 7: **if** $a_{ik} \leq A'_m$ $rd_m \leq dd_i$ donde k es la siguiente pieza con mayor prioridad **then** Se puede añ
-

3.7.3 REGLAS DE PRIORIDAD CONSIDERADAS

Para el heurístico de secuenciamiento se consideraron solamente dos reglas de prioridad: menor tiempo de diseño y mayor tiempo de impresión. De esta manera las piezas que pudieran entrar rápidamente a la operación de impresión y requieran más tiempo de procesamiento tendrían mayor prioridad.

$$Nd_{ij} = -td_{ij} + te_{ij} \quad (3.24)$$

3.7.4 RE SECUENCIAMIENTO

En el caso de que una orden cambie su nivel de prioridad, ya sea por decision gerencial o requerimiento del cliente; o que llegue una nueva orden de alta prioridad, es necesario realizar un resecuenciamiento de las piezas en las estaciones.

Como el proceso de planeacion y secuenciamiento no se realiza en tiempo real ni en linea con las máquinas, basta con volver a correr los tres algoritmos considerando solamente el tiempo restante del periodo, así como las ordenes que aun no han sido procesadas hasta el momento.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la prueba del modelo se evaluaron instancias con distinta cantidad de órdenes y piezas a procesar, además de que se varió la cantidad de máquinas disponibles tanto para diseño como impresión y la duración del periodo de trabajo. Igualmente se evaluaron distintas ponderaciones en las funciones objetivo para encontrar soluciones eficientes y armar un Frente de Pareto.

4.1 DESEMPEÑO DEL MODELO MILP

Se probó el desempeño del modelo de programación lineal mixta variando la cantidad de ordenes a procesar, las máquinas disponibles y la duración del periodo de programación. El modelo fue probado usando el solver comercial GAMS, utilizando el motor de optimización lineal entera CPLEX y como único parámetro especial un límite de tiempo 600 seg en la solución del modelo lineal.

4.1.1 INSTANCIAS UTILIZADAS

Las instancias utilizadas se generaron aleatoriamente tomando como base datos de venta y producción de un negocio real de manufactura aditiva. La estructura de las instancias utilizadas fue la siguiente:

- **Órdenes** Cantidad de órdenes a secuenciar, se consideraron tres niveles: 5, 10 y 20 órdenes. Cada una contaba con la siguiente información:
 - Piezas A lo máximo 10 piezas por orden a procesar.
 - Fecha compromiso
 - Ganancia económica
 - Nivel de prioridad Se consideraron tres niveles de prioridad, siendo el valor de 1 la más baja prioridad y 3 la más alta.

A su vez cada pieza dentro de la orden cuenta con la siguiente información:

- Área
- Tiempo de diseño
- Tiempo estimado de impresión
- Tiempo real de impresión.

En caso de que la pieza ya contara con diseño entonces su tiempo de diseño era de cero.

Finalmente se incluyen los parámetros de las maquinas de impresión.

- Área total de impresión
- Tiempo de preparación

4.1.2 ÓPTIMOS INDIVIDUALES

Se evaluaron los valores óptimos individuales para encontrar el punto ideal de los 3 objetivos.

TABLA 4.1: Resultados del modelo

	f1	f2	f3	Mejor Posible	Tiempo Computo [seg]	Iteraciones
Obj 1	2036	-3.00E-07	1.00E+07	2096	05:10.7	108978
Obj 2	0	18662	693	31120	10:07.8	138295
Obj 3	0	16013	711	287	10:06.4	144886
Ideal	2036	18662	711	-	-	-
Nadir	0	-3.00E-07	1.00E+07	-	-	-

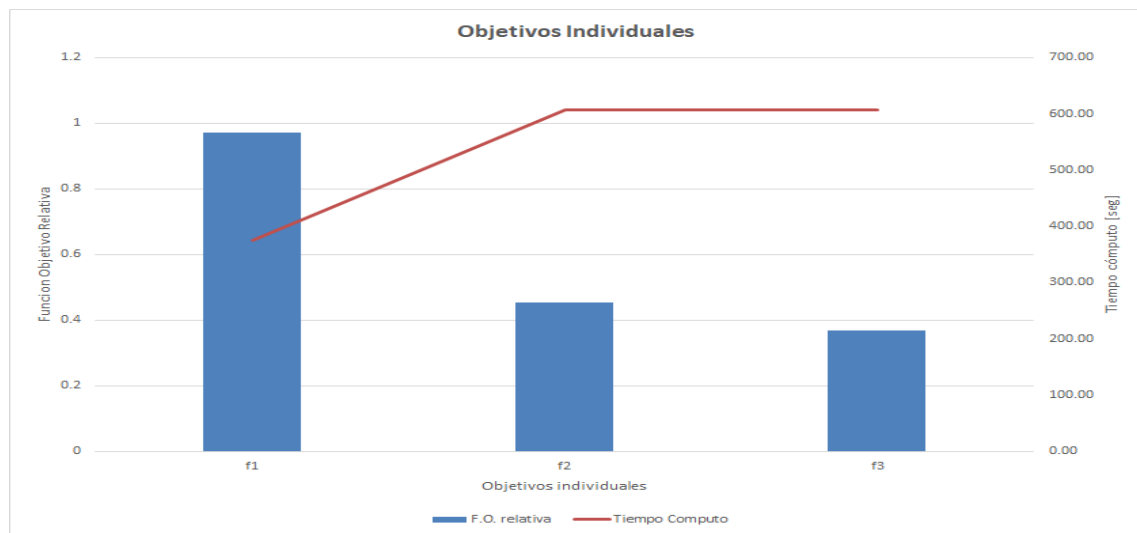


FIGURA 4.1: Comparación objetivos individuales en modelo.

En la gráfica 4.1 podemos ver que tan cercanos estuvieron los objetivos individuales de ser alcanzados junto con el tiempo que tomó llegar a la solución. La solución encontrada en el objetivo 1 fue alcanzada en el menor tiempo y fue muy cercana al mejor posible, para las otras dos funciones fue el caso contrario, los valores

alcanzados distan más del valor real y el cálculo de la solución fue detenido ya que superó el tiempo máximo de cálculo en ambos casos.

Esta diferencia en la calidad de las soluciones se puede explicar debido a la naturaleza de las funciones objetivo, en la primera de ellas el objetivo está ligado únicamente a que las ordenes sean completadas en el tiempo requerido, para esto el objetivo es bastante ayudado por el ordenamiento inicial del modelo, siendo muy similar a un problema de mochila bidimensional que se resuelve heurísticamente. En el caso de las otras dos funciones objetivo, el secuenciamiento de cada pieza juega un papel mucho más importante, por lo que el problema es similar a uno de Job Shop Scheduling con restricciones combinatorias, aumentando su complejidad.

4.1.3 EFECTO DE LAS MÁQUINAS DISPONIBLES

Se comparó el efecto de la cantidad de máquinas disponibles en cada estación, esta comparativa fue realizada para los 3 objetivos individuales considerando el secuenciamiento de 10 ordenes de pedidos, los valores reportados son las funciones objetivo relativas a la mejor solución posible; las máquinas disponibles se refieren tanto para la estación de diseño e impresión.

De la gráfica 4.2 vemos el promedio de las funciones objetivo relativas optimizando cada una por individual, podemos observar que la cantidad de máquinas mejora la solución alcanzada.

En la gráfica 4.3 se incluye la función objetivo ponderada, en ella se gráfica el promedio de iteraciones requeridas para la solución, observamos que la cantidad de disminuye conforme se agregan máquinas al problema, sin embargo el tiempo de solución no se ve mejorado, ya que el cálculo de las funciones 2, 3 y la ponderada

superan el tiempo máximo de computo.

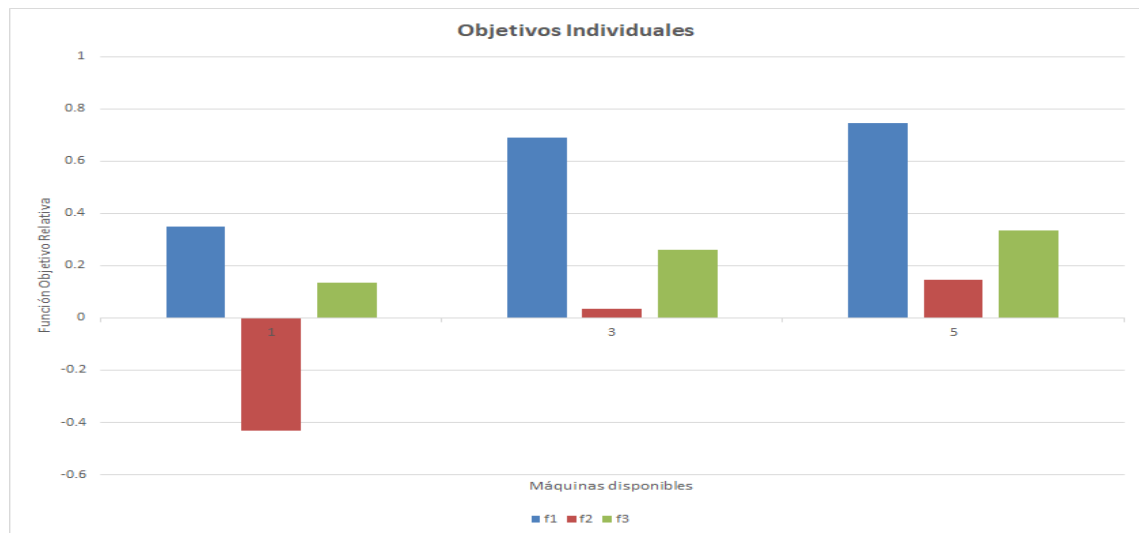


FIGURA 4.2: Efecto por máquinas disponibles en modelo.

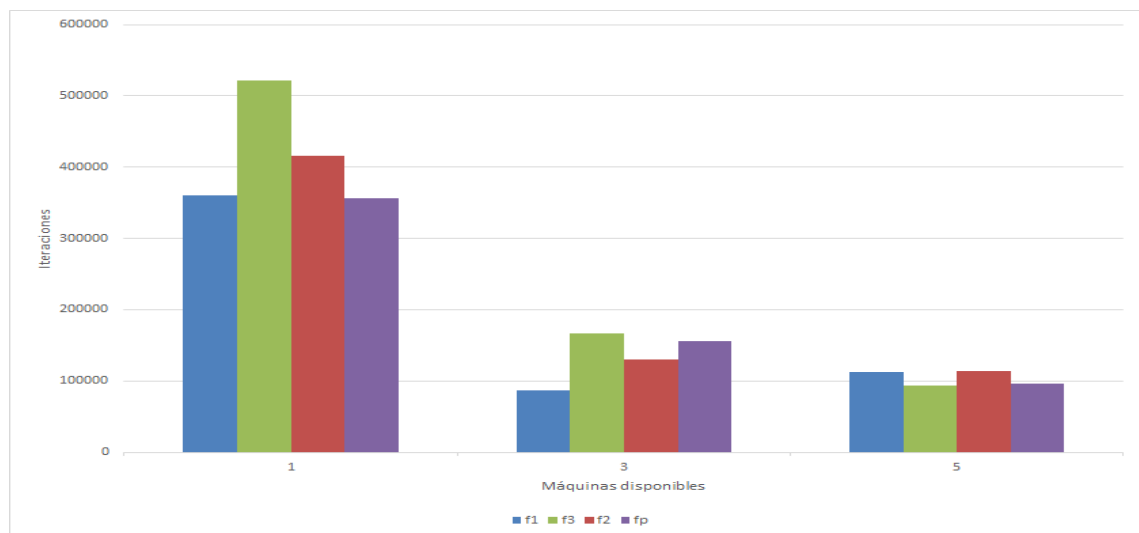


FIGURA 4.3: Iteraciones por efecto de máquinas en modelo.

4.1.4 EFECTO DE ORDENES A SECUENCIAR

Se comparó el efecto de secuenciar diferente cantidad de órdenes, para la comparación se consideró un periodo de secuenciamiento y máquinas disponibles fijas.

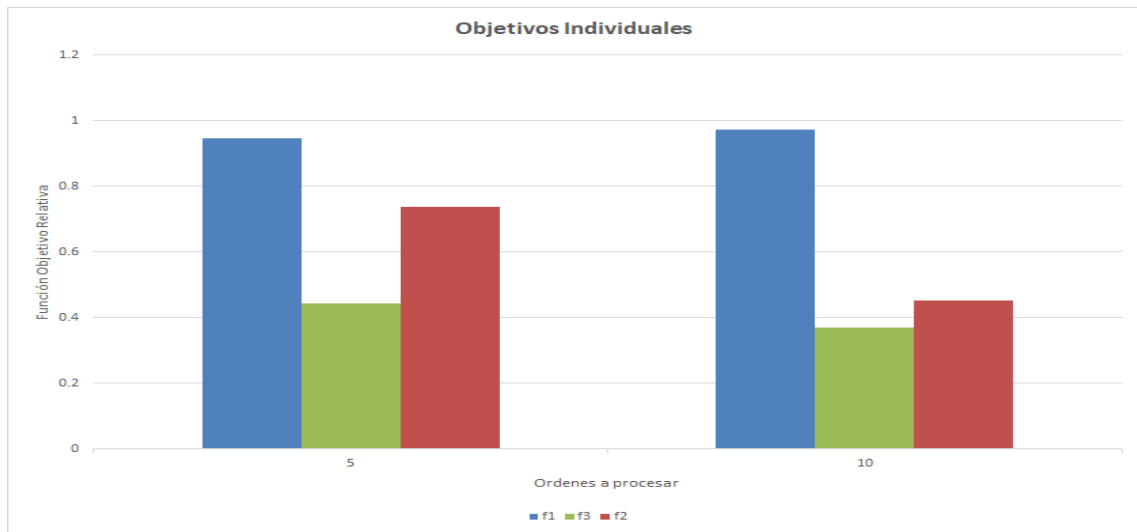


FIGURA 4.4: Objetivos alcanzados por efecto de ordenes procesadas en modelo.

La gráfica 4.4 compara los valores objetivo alcanzados respecto a su mejor solución posible para cada cantidad de órdenes. Vemos que la cantidad de ordenes, y por tanto piezas, a procesar afecta principalmente a los objetivos 2 y 3 que dependen principalmente del secuenciamiento de las piezas, como se mencionó anteriormente, estos objetivos corresponden a un problema de mayor complejidad por lo que su solución se ve afectada por la cantidad de piezas a procesar.

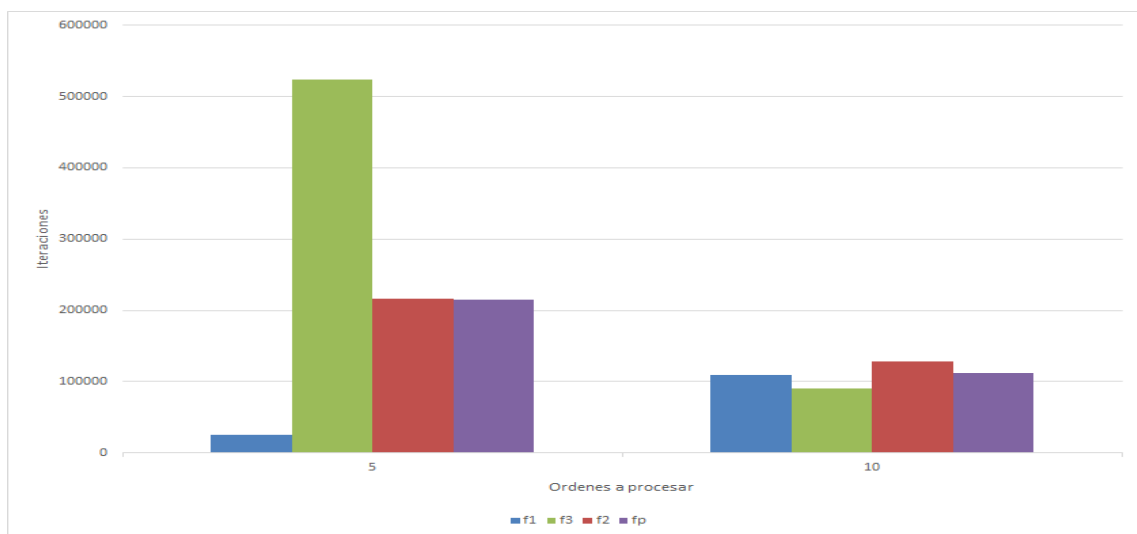


FIGURA 4.5: Iteraciones por efecto de ordenes procesadas en modelo.

En la gráfica 4.5 se observa la cantidad de iteraciones, igual que la gráfica 3 se incluye la función objetivo ponderada y de igual manera el tiempo de ejecución no se ve mejorado ya que a excepción de la f1, el tiempo de solución excedía el máximo permitido.

4.1.5 EFECTO DE DURACIÓN DEL PERIODO

Como parte del planteamiento del modelo se consideró un tiempo de duración del periodo de secuenciamiento, la hipótesis para el uso de este parámetro es que a menor tiempo, el modelo sería más fácil de resolver ya que solo se secuenciarían las ordenes seleccionadas para el periodo en cuestión. Para esta comparación se consideró una cantidad de máquinas fija y el procesamiento de 10 ordenes.

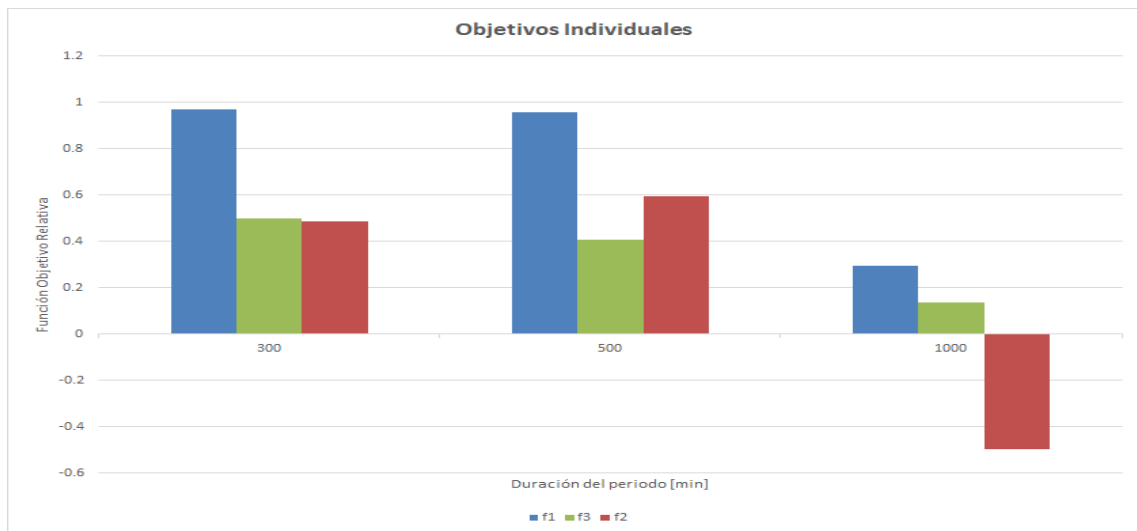


FIGURA 4.6: Objetivos alcanzados por efecto de duración de periodo en modelo.

La gráfica 4.6 muestra el efecto de variar la duración del periodo, si bien en los periodos de 300 y 500 minutos no representan un cambio considerable, el efecto se acentúa en el periodo de 1000 min, la cantidad de ordenes a procesar en el periodo es mucho mayor, lo que afecta considerablemente en el cálculo.

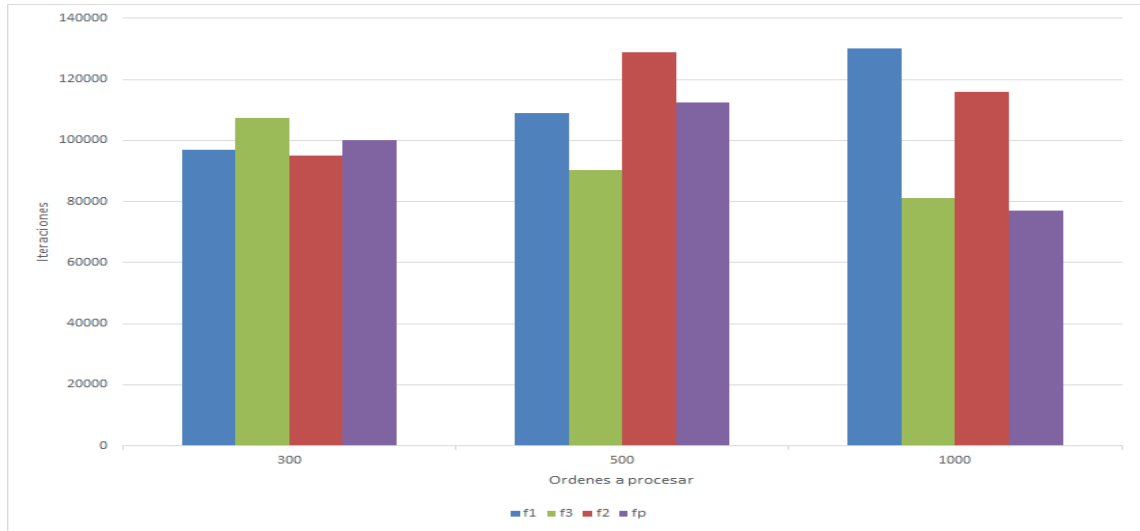


FIGURA 4.7: Iteraciones por efecto de duración de periodo en modelo.

En cuanto a la cantidad de iteraciones, en la gráfica 4.7, no vemos un cambio significativo respecto a la duración del periodo, igual que en las comparaciones previas el tiempo de calculo excedió el límite.

4.1.6 FRENTE DE PARETO

Se evaluaron 16 ponderaciones diferentes para las funciones objetivo con el fin de encontrar soluciones eficientes y armar un frente de pareto, los cálculos se realizaron para 10 ordenes, manteniendo constante la cantidad de máquinas disponibles y la duración del periodo.

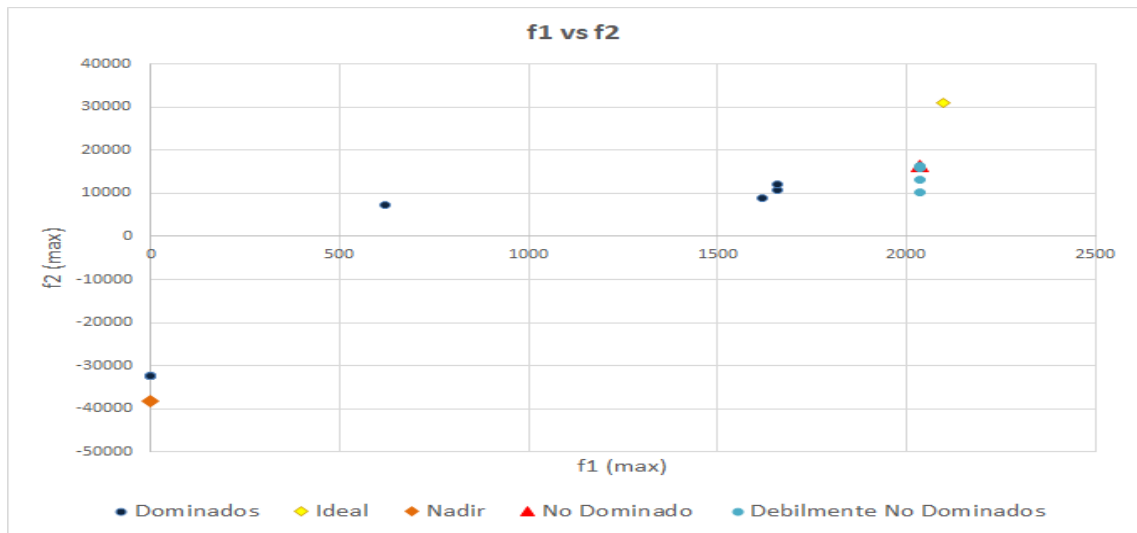


FIGURA 4.8: Frente de Pareto para Funciones 1 y 2 en modelo.

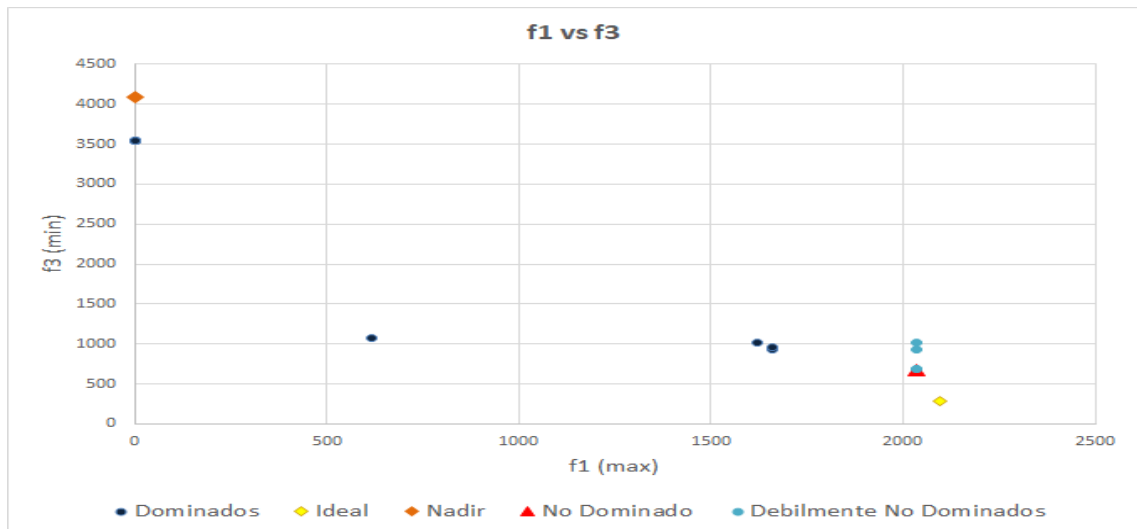


FIGURA 4.9: Frente de Pareto para Funciones 1 y 3 en modelo.

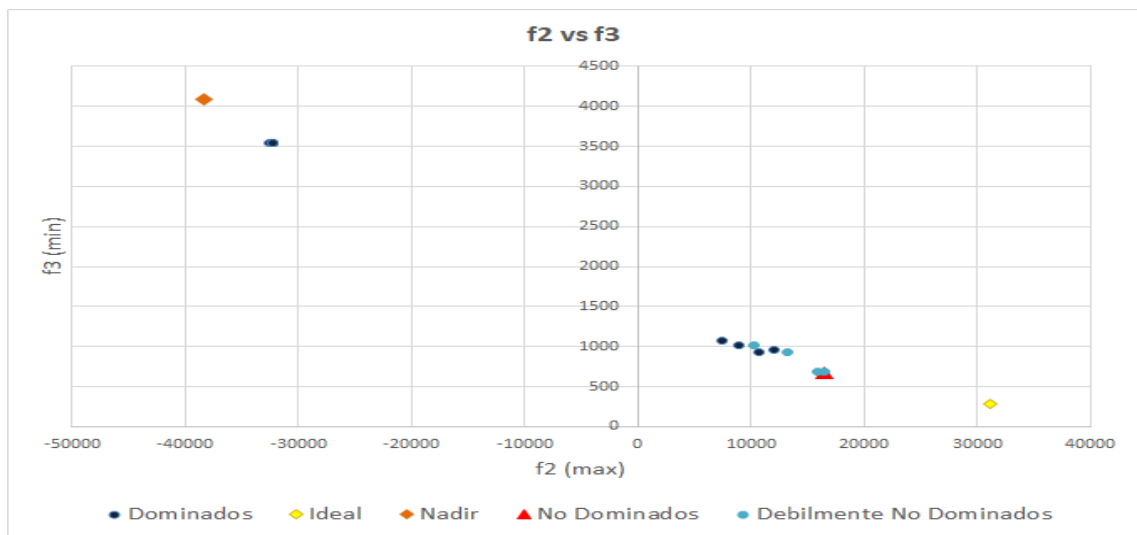


FIGURA 4.10: Frente de Pareto para Funciones 2 y 3 en modelo.

4.2 DESEMPEÑO DE HEURÍSTICO CON REGLAS DE PRIORIDAD

Se probó el desempeño del algoritmo heurístico basado en reglas de prioridad, se aplicaron los mismos criterios que los usados para evaluar el desempeño del modelo de programación entera lineal mixta. El algoritmo fue probado usando el solver comercial GAMS, poniendo como límite de tiempo 600 seg en la solución del modelo lineal.

4.2.1 FUNCIONES INDIVIDUALES

Se evaluaron las funciones objetivo individuales correspondientes a cada regla de prioridad.

TABLA 4.2: Resultados heurístico

	f1	f2	f3	Tiempo Computo (seg)
Objetivo 1	2056	8922	1221	00:00.3
Objetivo 2	1706	9244	1197	00:00.3
Objetivo 3	1377	5618	1618	00:00.2
Ideal	2056	9244	1197	-
Peor	1377	5618	1618	-

En la gráfica 11 podemos ver que tan cercanos estuvieron los objetivos individuales de alcanzar el mejor resultado posible reportado en el modelo de programación lineal junto con el tiempo que tomo llegar a la solución. El comportamiento del resultado es muy similar al reportado en la gráfica 1 del modelo lineal, debe destacarse que el heurístico es mucho más rápido a costa de un menor desempeño, esto se analizará a detalle en la sección siguiente.

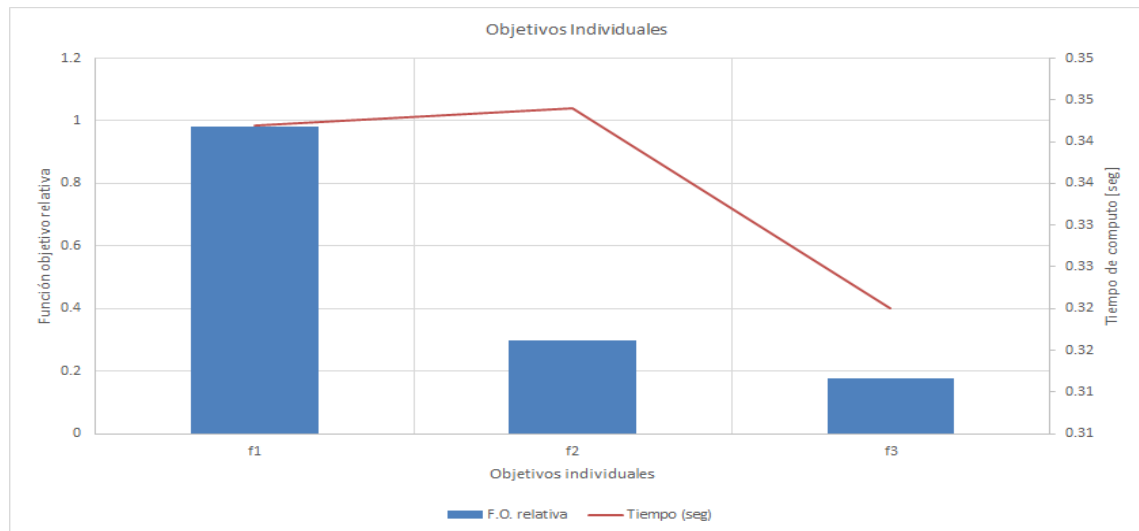


FIGURA 4.11: Comparación de objetivos individuales en heurístico.

4.2.2 EFECTO DE LAS MÁQUINAS DISPONIBLES

De manera similar que la sección anterior, se comparó el efecto de agregar máquinas al modelo.

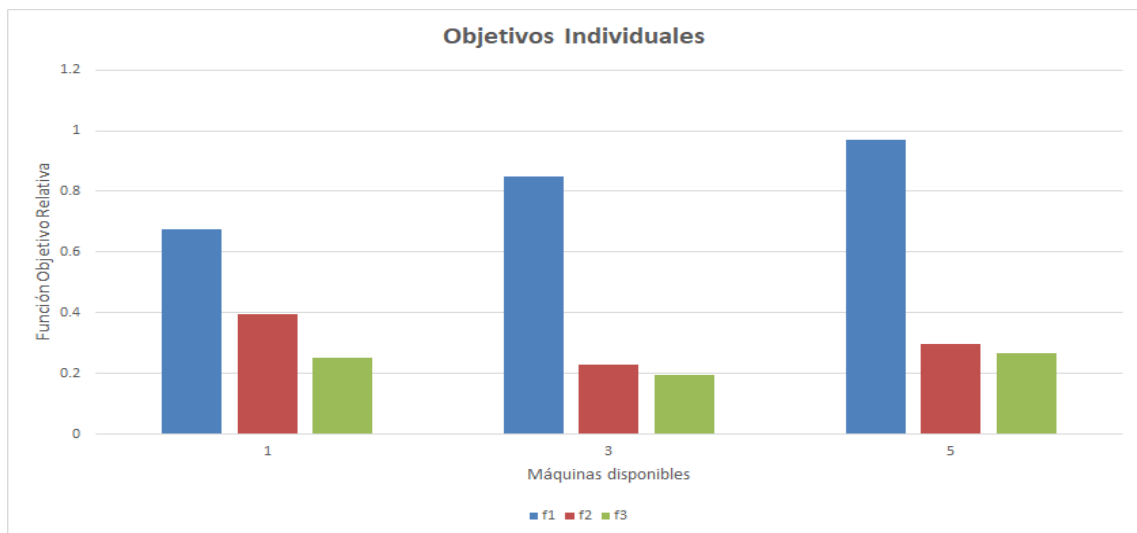


FIGURA 4.12: Efecto por máquinas disponibles en heurístico.

De la gráfica 4.12 vemos el promedio de las funciones objetivo relativas optimizando cada una por individual, podemos observar que la cantidad de máquinas mejora la solución alcanzada, además de que se obtienen mejores resultados que el modelo MILP.

4.2.3 EFECTO DE ORDENES A SECUENCIAR

Se comparó el efecto de secuenciar diferente cantidad de órdenes, para la comparación se consideró un periodo de secuenciamiento y máquinas disponibles fijas.

La gráfica 4.13 compara los valores objetivo alcanzados respecto a su mejor

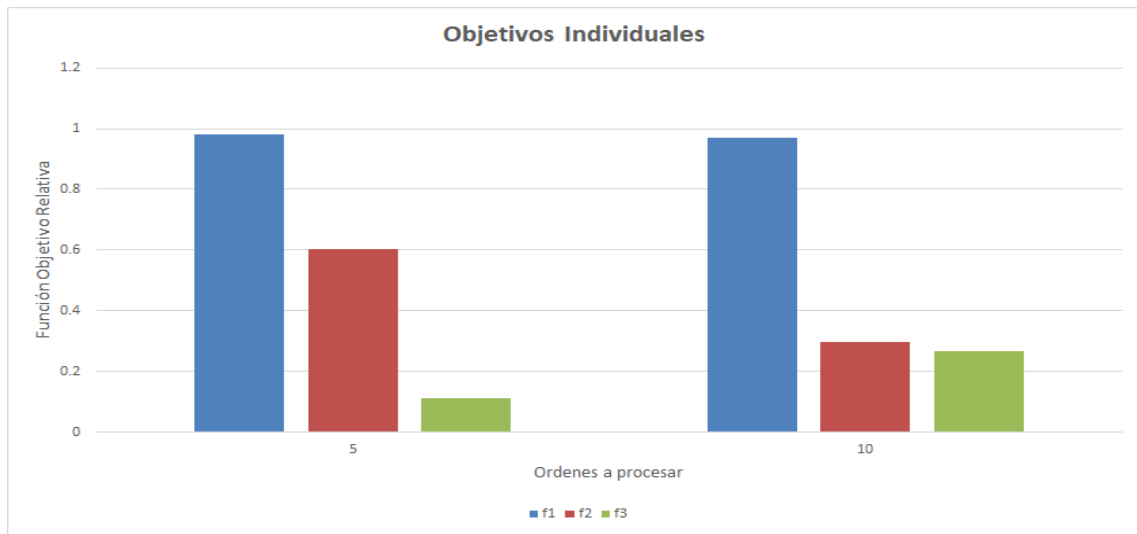


FIGURA 4.13: Efecto por ordenes a procesar en heurístico.

solución posible para cada cantidad de órdenes. El comportamiento del heurístico parece variar respecto al modelo lineal, la función objetivo 2 parece disminuir su desempeño con el incremento de las ordenes, mientras que el objetivo 3 se incrementó.

4.2.4 EFECTO DE DURACIÓN DEL PERIODO

Al igual que en la sección anterior se comparó el cambio en la duración del periodo de secuenciamiento, se consideraron los mismos parámetros.

La gráfica 4.14 muestra el efecto de variar la duración del periodo, similar al efecto de variar las ordenes a procesar, el desempeño del modelo parece cambiar dependiendo del objetivo considerado.

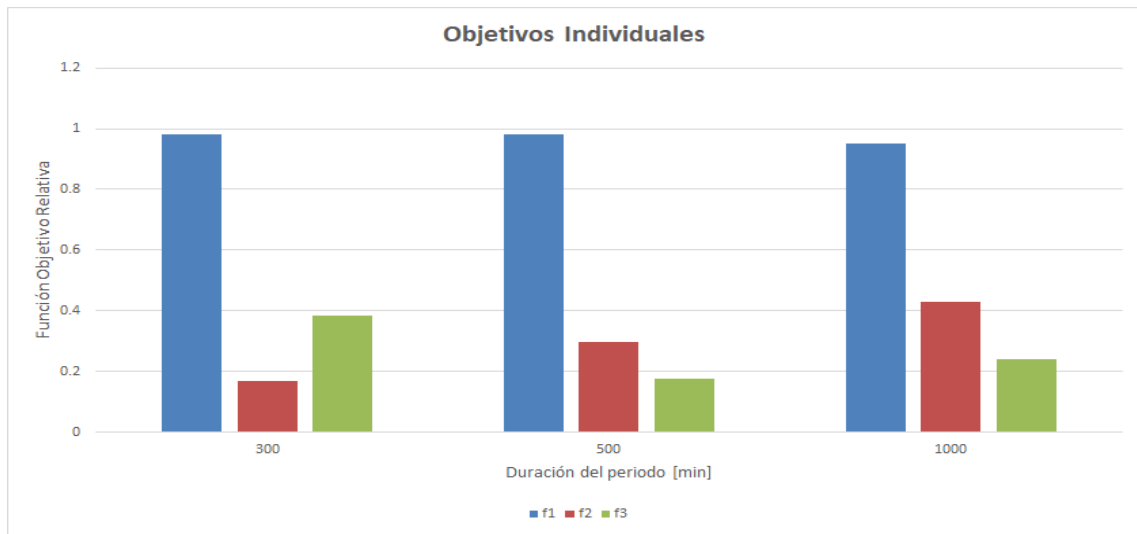


FIGURA 4.14: Efecto por duración de periodo en heurístico.

4.2.5 FRENTE DE PARETO

Se evaluaron las mismas 16 ponderaciones que en la sección anterior.

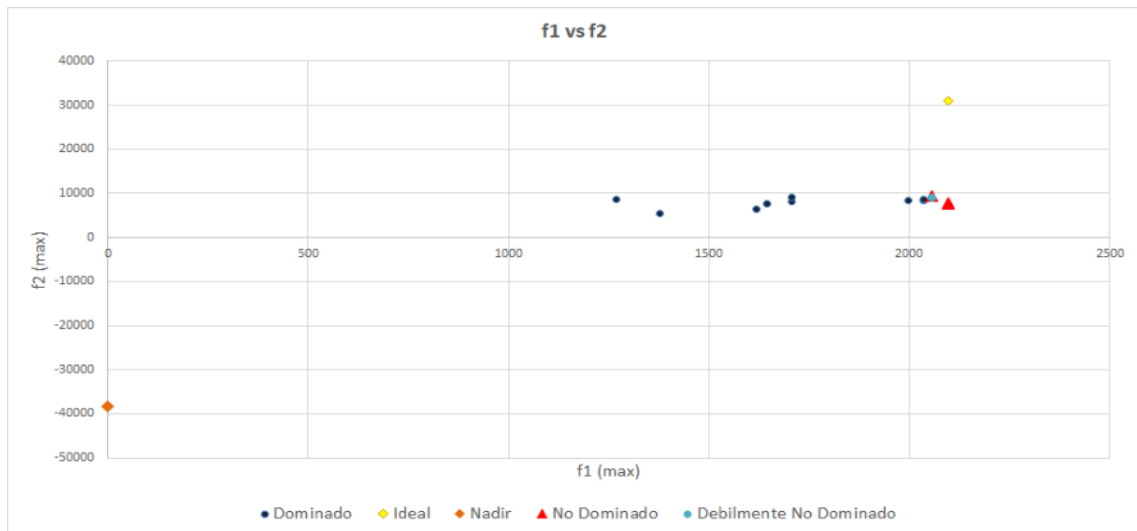


FIGURA 4.15: Frente de Pareto para Funciones 1 y 2 en heurístico.

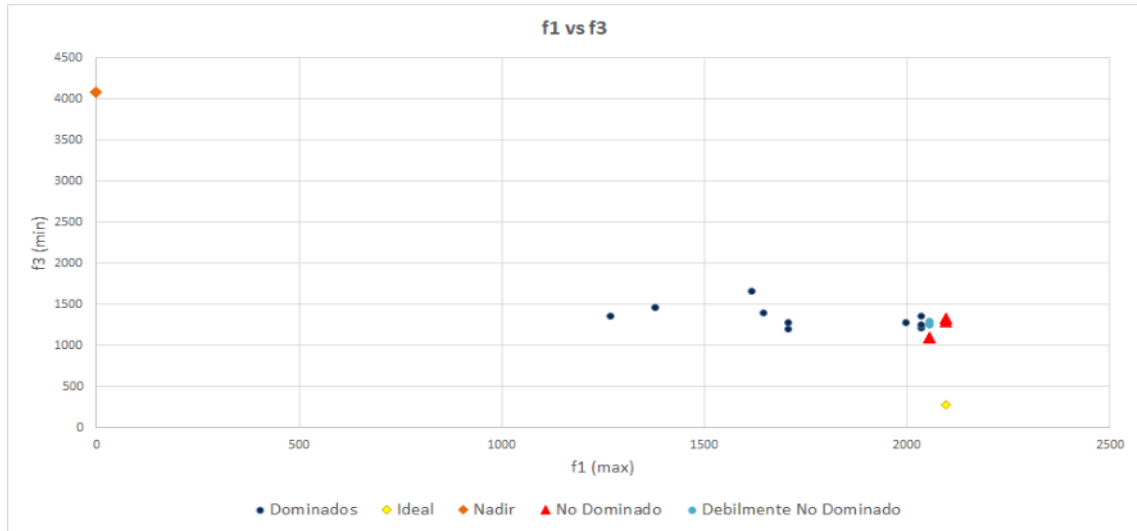


FIGURA 4.16: Frente de Pareto para Funciones 1 y 3 en heurístico.

4.3 COMPARACIÓN

El modelo de MILP da resultados aceptables aunque aun bastante alejados de la mejor solución alcanzable para los objetivos con restricciones duras, sería posible mejorar su desempeño utilizando una formulacion diferente, tal como la formulacion MTZ o sus variantes posteriores para el problema de minimizacion de tiempo y maximización de prioridad.

El heurístico constructivo por el contrario encuentra soluciones en tan solo una milésima del tiempo que lo hace el modelo MILP y aunque sus resultados no son tan buenos en comparacion, estos no distan mucho de lo alcanzado, siendo que para el objetivo 1, de maximizacion de ganancia, ambos alcanzan resultados muy similares; en el caso de los otros dos objetivos la diferencia es de apenas un 10 % respecto al modelo MILP.

El algoritmo heuristico podría alcanzar mejores resultados aplicando técnicas heurísticas de búsqueda local o métodos multiarranque, los cuales sacrificarían algo de tiempo pero sin llegar demorar tanto como el modelo lineal mixto.

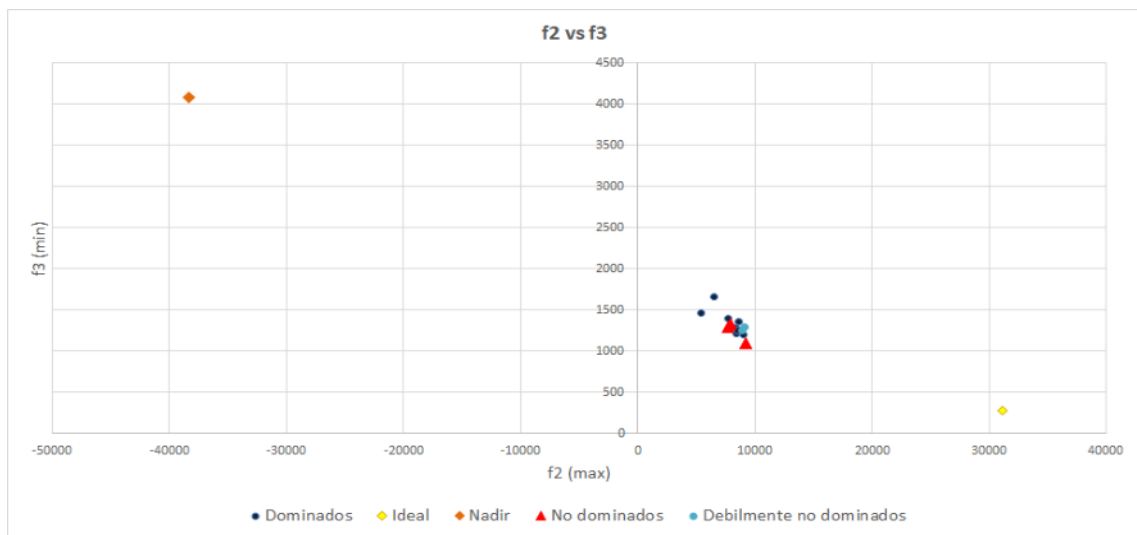


FIGURA 4.17: Frente de Pareto para Funciones 2 y 3 en heurístico.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones y trabajo a futuro en esta investigación.

5.1 CONCLUSIONES

- Se desarrollaron métodos exactos y heurísticos para la solución al problema multicriterio de maximización de ganancia, prioridad y minimización de tiempo de completamiento de un ambiente Job Shop Scheduling aplicado en el secuenciamiento de operaciones en un ambiente de manufactura aditiva con sus restricciones tales como máquinas paralelas no idénticas, tiempos de preparación de máquina y capacidad de máquina.
- Ambas metodologías se implementaron junto a una descomposición de horizonte rodante basada en reglas de prioridad, con el cual se trabajó con un subconjunto de los elementos a secuenciar, este método resultó ser bastante eficaz en ambos casos ya que se alcanzaron mejores resultados en menor tiempo al acortar el total de elementos.
- Se implementó un método de solución basado en un modelo MILP utilizando el software comercial GAMS y el motor de optimización CPLEX, esta metodo-

logía arrojo buenas soluciones para el problema de maximización de ganancia, sin embargo no fue muy eficaz en la solución de los otros dos, ya que al poseer restricciones más fuertes este requería mucho más tiempo de ejecución con poca mejora.

- El método heurístico se basó en el uso de reglas de prioridad para el secuenciamiento de operaciones, el tiempo de ejecución fue mucho menor al método anterior, y aunque los resultados no fueron tan buenos como el anterior, eran suficientes para considerar el método como una alternativa válida y más rápida.
- Se encontraron soluciones eficientes y débilmente eficientes para el problema multicriterio utilizando la metodología de suma ponderada.

5.2 TRABAJO A FUTURO

- Las metodologías presentadas ofrecen un buen acercamiento a la solución del problema, en cuanto al modelado matemático para el método MILP se tendrían que buscar mejores restricciones para la combinatoria de las piezas dentro de la secuencia, la cual impactó fuertemente en el tiempo de ejecución. El método heurístico se podría mejorar mediante métodos multiarranque o de búsqueda local, lo cual estuvo fuera del alcance del proyecto.
- La generación de soluciones eficientes para el frente de Pareto se abordó usando una sola metodología, se deben de abordar diferentes métodos que permitan una solución más efectiva para el problema.
- Si bien el modelo abarca diversas restricciones para el problema estudiado, aun se pueden añadir más para acercarlo más a la realidad, cuestiones tales como la geometría de las piezas a procesar, su orientación dentro de la máquina de impresión o diferencias de velocidad para el procesamiento en las estaciones son restricciones que aun se pueden incorporar al modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wong, K. V., Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. International scholarly research notices, 2012.
- [2] Wolsey, L. (1998). Formulations. In Integer Programming, L. Wolsey (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119606475.ch1>
- [3] WM.L. Pinedo, Scheduling, DOI: 10.1007/978-0-387-78935-4 1, Springer Science+Business Media, LLC 2008
- [4] WM.L. Pinedo, Scheduling, DOI: 10.1007/978-0-387-78935-4 7, Springer Science+Business Media, LLC 2008
- [5] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 143(December 2017), 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- [6] 1. ISO / ASTM52900-15, Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015,
www.astm.org
- [7] 3. McCue, TJ. (2020) Additive Manufacturing Industry Grows To Almost \$12 Billion In 2019 Forbes
<https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2020/05/08/additive-manufacturing-industry-grows-to-almost-12-billion-in-2019/5db205ff5678>

-
- [8] Garey, M. R., Johnson, D. S., Sethi, R. (1976). COMPLEXITY OF FLOWSHOP AND JOBSHOP SCHEDULING. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117–129. <https://doi.org/10.1287/moor.1.2.117>
- [9] Salido, M. A., Escamilla, J., Barber, F., Giret, A. (2017). Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems. *Journal of Cleaner Production*, 162, S121–S132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.002>
- [10] Liu, S. Q., Kozan, E., Masoud, M., Zhang, Y., Chan, F. T. S. (2018). Job shop scheduling with a combination of four buffering constraints. *International Journal of Production Research*, 56(9), 3274–3293. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1401240>
- [11] Beemsterboer, B., Land, M., Teunter, R., Bokhorst, J. (2017). Integrating make-to-order and make-to-stock in job shop control. *International Journal of Production Economics*, 185, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.12.015>
- [12] Yu, L., Zhu, C., Shi, J., Zhang, W. (2017). An Extended Flexible Job Shop Scheduling Model for Flight Deck Scheduling with Priority, Parallel Operations, and Sequence Flexibility. *Scientific Programming*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2463252>
- [13] Froehlich, G. E. A., Kiechle, G., Doerner, K. F. (2019). Creating a multi-iterative-priority-rule for the job shop scheduling problem with focus on tardy jobs via genetic programming. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11353 LNCS, 64–77. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2-6>
- [14] Nouri, M., Bekrar, A., Jemai, A., Niar, S., Ammari, A. C. (2018). An effective and distributed particle swarm optimization algorithm for flexible job-shop scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 603–615. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1039-3>

-
- [15] Gao, K. Z., Suganthan, P. N., Pan, Q. K., Tasgetiren, M. F., Sadollah, A. (2016). Artificial bee colony algorithm for scheduling and rescheduling fuzzy flexible job shop problem with new job insertion. *Knowledge-Based Systems*, 109, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.06.014>
- [16] Karunakaran, D., Mei, Y., Chen, G., Zhang, M. (2017). Dynamic Job Shop Scheduling Under Uncertainty Using Genetic Programming (pp. 195–210). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49049-6-14>
- [17] Ahmed, R., Khan, M. M., Haque, M. H., Rahman, M. H. (2016). An approach to develop a dynamic job shop scheduling by fuzzy rule based system and comparative study with the traditional priority rules. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(2), 202–212. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016.202.212>
- [18] Habib, A., Ahsan, N., Khoda, B. (2015). Optimizing Material Deposition Direction for Functional Internal Architecture in Additive Manufacturing Processes. *Procedia Manufacturing*, 1, 378–392. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.045>
- [19] Zhu, Z., Dhokia, V., Newman, S. T. (2013). The development of a novel process planning algorithm for an unconstrained hybrid manufacturing process. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.006>
- [20] Li, Q., Kucukkoc, I., Zhang, D. Z. (2017). Production planning in additive manufacturing and 3D printing. *Computers and Operations Research*, 83, 1339–1351. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.01.013>
- [21] Fera, M., Fruggiero, F., Lambiase, A., Macchiaroli, R., Todisco, V. (2018). A modified genetic algorithm for time and cost optimization of an additive manufacturing single-machine scheduling. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(4), 423–438. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.1.001>

-
- [22] Fera, M., Macchiaroli, R., Fruggiero, F., Lambiase, A. (2020). A modified tabu search algorithm for the single-machine scheduling problem using additive manufacturing technology. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(3), 401–414. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2020.1.001>
- [23] 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>.
- [24] Dvorak, F., Micali, M., Mathieu, M. (2018). Planning and scheduling in additive manufacturing. *Inteligencia Artificial*, 21(62), 40–52. <https://doi.org/10.4114/intartif.vol21iss62pp40-52>
- [25] Li, Q., Zhang, D., Wang, S., Kucukkoc, I. (2019). A dynamic order acceptance and scheduling approach for additive manufacturing on-demand production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 3711–3729. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03796-x>
- [26] Zhang, J., Yao, X., Li, Y. (2019). Improved evolutionary algorithm for parallel batch processing machine scheduling in additive manufacturing. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1617447>
- [27] 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>
- [28] Zhang, R., Chiong, R. (2016). Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3361–3375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.097>

-
- [29] Ahmadi, E., Zandieh, M., Farrokh, M., Emami, S. M. (2016). A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms. *Computers and Operations Research*, 73, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.03.009>
- [30] Lu, C., Li, X., Gao, L., Liao, W., Yi, J. (2017). An effective multi-objective discrete virus optimization algorithm for flexible job-shop scheduling problem with controllable processing times. *Computers and Industrial Engineering*, 104, 156–174. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.020>
- [31] Lu, C., Gao, L., Li, X., Xiao, S. (2017). A hybrid multi-objective grey wolf optimizer for dynamic scheduling in a real-world welding industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 57(March 2016), 61–79. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.10.013>
- [32] Baumung, W., Fomin, V. V. (2018). Optimization Model to Extend Existing Production Planning and Control Systems for the Use of Additive Manufacturing Technologies in the Industrial Production. *Procedia Manufacturing*, 24, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.035>
- [33] Fernandez, E., Lopez, F., Navarro, J., Vega, I., Litvinchev, I. (2009). An integrated mathematical-computer approach for RD Project selection in large public organisations. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 1(3), 372–396. <https://doi.org/10.1504/IJMOR.2009.024291>
- [34] Litvinchev, I., López, F., Escalante, H. J., Mata, M. (2011). A milp bi-objective model for static portfolio selection of RD projects with synergies. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 50(6), 942–952. <https://doi.org/10.1134/S1064230711060165>.
- [35] Litvinchev, I., López, F. (2008). An interactive algorithm for portfolio bi-criteria optimization of RD projects in public organizations. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 47(1), 25–32. <https://doi.org/10.1134/s1064230708010048>

-
- [36] Caldeira, R. H., Gnanavelbabu, A., Vaidyanathan, T. (2020). An effective backtracking search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling considering new job arrivals and energy consumption. *Computers and Industrial Engineering*, 149(September), 106863. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106863>
- [37] Savolainen, J., Collan, M. (2020). How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models? – Review of Literature. *Additive Manufacturing*, 32, 101070. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101070>
- [38] Bhuvanesh Kumar, M., Sathiya, P. (2021). Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures*, 159(October), 107228. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>
- [39] Alemão, D., Rocha, A. D., Barata, J. (2021). Smart manufacturing scheduling approaches—systematic review and future directions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/app11052186>
- [40] Chen, R., Yang, B., Li, S., Wang, S. (2020). A self-learning genetic algorithm based on reinforcement learning for flexible job-shop scheduling problem. *Computers and Industrial Engineering*, 149(June), 106778. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106778>
- [41] Rodríguez, J.J.T. and Fernando, L.-I. (2022). Decision Support Methodology for Scheduling Orders in Additive Manufacturing. In *Artificial Intelligence in Industry 4.0 and 5G Technology* (eds P. Vasant, E. Munapo, J.J. Thomas and G.-W. Weber). <https://doi.org/10.1002/9781119798798.ch2>