

Nota de Aceptación:

Proyecto de Diseño Aprobado, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.



HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias –
Codirector del Proyecto de Diseño



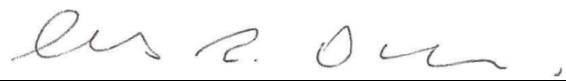
JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO
Director Carrera Ingeniería Industrial



FABIÁN ANDRÉS CASTAÑO GIRALDO
Director del Proyecto de Diseño



HÉCTOR FABIO BONILLA
Jurado 1



CARLOS ALBERTO OLARTE
Jurado 2

Santiago de Cali, 21 de junio de 2021

Dirigido al Profesor Álvaro Figueroa

Mediante la presente autorizo que se realice la última entrega del proyecto “Diseño de una metodología para disminuir el número de trabajos tardíos en un centro de impresión 3D” realizado por la estudiante Ana Sofía Ariza Cardona.

Cordialmente,



Hernán Camilo Rocha Niño - Decano de la
Facultad de Ingeniería y Ciencias



Fabián Andrés Castaño Giraldo - Profesor del
Departamento de Ingeniería Civil e Industria



Diseño de una metodología para disminuir el número de trabajos tardíos en un centro de impresión 3D

Ana Sofía Ariza Cardona^{a,d},
Fabián Andrés Castaño Giraldo^{b,d}, Camilo Rocha^{c,d}, Juan David Contreras Pérez

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^cProfesor, Codirector del Proyecto de Grado, Departamento de Electrónica y Ciencias de la Computación

^dPontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

^eCoordinador del Centro de Automatización de Procesos

Resumen en español

El agendamiento de actividades busca realizar la asignación de un conjunto de tareas a un horario de trabajo sin que estas se superpongan y se cumpla con un objetivo de optimización. Este proyecto se enfoca en minimizar el número de trabajos tardíos en m máquinas paralelas idénticas tal que la demanda de los clientes del Centro de Automatización de Procesos de la Pontificia Universidad Javeriana pueda ser satisfecha antes de los plazos de entrega programados. De esta forma, se presenta un modelo matemático adaptado del planteamiento de Almasarwah, Chen, Süer y Yuan [12] para atender a restricciones de disponibilidad y permitir que fuera de la jornada de trabajo y antes del inicio del nuevo periodo de atención pueda ser culminada la ejecución de una última actividad en cada máquina. Además, se examina el desempeño de una heurística vanguardista propuesta por Ho y Chang [7] para aquellos contextos donde el presupuesto para acceder a un software de optimización es escaso y se contempla un panorama de completa disponibilidad. Finalmente, los algoritmos son evaluados a través de un largo banco de instancias simuladas, demostrando que ambos pueden ser sólidos y eficientes desde el punto de vista informático cuando se enfrentan a entornos realistas.

Palabras claves: Máquinas paralelas idénticas, Número de trabajos tardíos, Agendamiento de actividades, Restricciones de disponibilidad.

Abstract

Scheduling seeks to assign a set of activities to a work schedule such that they do not overlap also meet an optimization objective. This study focuses on minimizing the number of tardy jobs on m identical parallel machines that the demand at the Centro de Automatización de Procesos at Pontificia Universidad Javeriana can be satisfied before the deadlines. A mathematical model adapted from Almasarwah, Chen, Süer, and Yuan's approach in [12] is presented to consider unavailability constraints and the allowance of the last activity to be completed outside of the working interval and before the beginning of the next one. Moreover, is examined the performance of a state-of-the-art heuristic approach developed by Ho and Chang in [7] to provide near-optimal results that properly work in practice, particularly for those contexts where the budget to get access to cutting-edge optimization software is scarce and is considered complete availability. Finally, the proposed algorithms are evaluated through a large testbed of simulated instances, demonstrating that both may be strong and computationally efficient when faced with realistic settings.

Key Words: Identical parallel machines, Number of tardy jobs, Scheduling, unavailability constraints.

Agradecimientos

A Najat E. Almasarwah parte del grupo de autores que desarrollaron el artículo *Minimizing the Number of Tardy Jobs on Identical Parallel Machines Subject to Periodic Maintenance* por permitirme poner en contacto para despejar dudas acerca del modelo propuesto en este. A mi director Fabián Andrés Castaño Giraldo, codirector Camilo Rocha, y hermano Juan Camilo Ariza Cardona por brindarme diversos espacios para resolver inquietudes y realizar seguimiento a mi proyecto.

Tabla de contenido

I. PROJECT CHARTER

II. DEFINIR	5
A. Contexto y Justificación	5
B. Grupos de interés	7
C. Requerimientos	8
III. MEDIR	10
A. Plan de recolección de datos	10
B. Medición del sistema actual	10
IV. ANALIZAR	14
A. Análisis de Causas	14
B. Revisión de literatura	15
C. Exploración de ideas y selección de alternativas	18
D. Objetivos	19
E. Plan de trabajo (PdT)	19
V. MEJORAR	20
A. Desarrollo del diseño de la solución	20
B. Validación del diseño propuesto	24
VI. CONTROLAR	25
A. Medición de los impactos	25
B. Estandarización de la solución – POE’S (plan de control)	28
C. Conclusiones	28
D. Recomendaciones	29
VII. GLOSARIO	30
VIII. REFERENCIAS	31
IX. ANEXOS	32

Índice de Tablas

TABLA I.....	7
TABLA II.....	7
TABLA III.....	8
TABLA IV.....	9
TABLA V.....	10
TABLA VI.....	10
TABLA VII.....	12
TABLA VIII.....	13
TABLA IX.....	16
TABLA X.....	19
TABLA XI.....	32

Índice de Figuras

Fig. 1. Ingresos proporcionados por la manufactura aditiva modificado de [3].....	5
Fig. 2 Diagrama del proceso de impresión 3D del CAP.	5
Fig. 3. Inconformidades detectadas en el servicio de impresión.	6
Fig. 4 Gráfico de poder vs interés de los Stakeholders representada en plano cartesiano.	8

Fig. 5. Mapa de procesos para la atención de solicitudes de impresión 3D.	11
Fig. 6. Distribución de la carga según el tipo de impresora 3D.....	11
Fig. 7. Gráfico de intervalos del tiempo máximo de finalización de la producción según la jornada y el nivel de demanda atendido	12
Fig. 8. Gráfico de intervalos del número de trabajos tardíos según la jornada y el nivel de demanda atendido.....	13
Fig. 9. Diagrama de Causa y Efecto para el servicio de impresión 3D en el CAP.	14
Fig. 10. Publicaciones realizadas en el área de la manufactura aditiva modificado de [33].....	16
Fig. 11. Gráfica de efectos principales para el tiempo computacional del modelo adaptado.	25
Fig. 12. Gráfica de interacción para el tiempo computacional del modelo adaptado.	25
Fig. 13. Gráfico de intervalos del número de trabajos a tiempo.....	26
Fig. 14. Gráfica de efectos principales para el tiempo computacional del modelo de Süer et al.[6] y la heurística de Ho y Chang [7].....	26
Fig. 15. Gráfica de interacción para el tiempo computacional del modelo de Süer et al. [6] y la heurística de Ho y Chang [7].....	27
Fig. 16. Gráfica de líneas para comparación del tiempo computacional del modelo de Süer [6] et al. y la heurística de Ho y Chang [7].....	27

Índice de Algoritmos

ALGORITMO I. PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO DE MOORE.....	21
ALGORITMO II. PSEUDOCÓDIGO DE LA HEURISTICA H2	22

I. PROJECT CHARTER

Descripción (Business case)		Planteamiento del problema (Problem statement)			
Este proyecto busca disminuir el número de trabajos tardíos durante la semana de parciales en el servicio de impresión 3D del Centro de Automatización de Procesos, dado que el atraso en la entrega es una de las principales causas de inconformidad entre los usuarios. De esta forma, se propone el diseño de una metodología para definir la secuencia de las actividades que deben montarse en las impresoras por parte del operario cuando este se encuentra en las instalaciones.		El servicio de impresión 3D del Centro de Automatización de Procesos de la Pontificia Universidad Javeriana seccional Cali presenta problemas en el agendamiento de las solicitudes que llegan a sus instalaciones, generando un 35,3% de usuarios insatisfechos con el servicio y en el peor escenario un 71,42% de demanda tarde.			
Impacto de los actores (Stakeholder's business needs)		Restricciones	Especificaciones	Marco legal	
Grupo de Interés	Impacto	<ul style="list-style-type: none"> •Personal CAP y monitorea: Atención de pedidos limitada debido a la contratación de monitores durante dos horas consecutivas. •Profesores y estudiantes: Los plazos de entrega pactados por los usuarios deben contemplar la capacidad del CAP para responder a la demanda. 	<ul style="list-style-type: none"> •Personal CAP y monitorea: Desempeñar una adecuada secuenciación de actividades tal que las solicitudes de la comunidad sean atendidas en un plazo mínimo de dos a doce días. •Profesores y estudiantes: Recibir el trabajo solicitado dentro del plazo de atención definido por el CAP con el cumplimiento de sus requerimientos. 	<ul style="list-style-type: none"> •Personal CAP y monitorea: Contrato de monitorea establecido por la Pontificia Universidad Javeriana Cali. •Profesores y estudiantes: Reglamento del profesor estipulado por la Pontificia Universidad Javeriana Cali. 	
Personal CAP	Impacto positivo, la propuesta les permitirá organizar el tiempo de la monitorea para atender necesidades específicas y reducir el nivel de inconformidad de los usuarios con el servicio.				
Profesores	Impacto positivo, podrán acceder al servicio adecuadamente y dejar trabajos a los estudiantes sin percances.				
Estudiantes	Impacto positivo, podrán acceder al servicio adecuadamente.				
Monitorea CAP	Impacto positivo, al hacer uso de la metodología podrá entregar los proyectos de impresión en el tiempo previsto.				
Indicadores de Desempeño (KPI's)					
Variable	Actualidad	Meta			
Número de trabajos tardíos. [Trabajos]	En la actualidad, de acuerdo con el número de trabajos ordenados en las semanas de parciales, se presenta un porcentaje de trabajos tardíos entre el 16,01% y 71,42 %.	Reducir la cantidad de trabajos tardíos de forma que para el mayor nivel de demanda atendida por el CAP el porcentaje de trabajos entregados luego de su plazo sea inferior al 71,42%.			
Tiempo máximo de finalización [Días]	El tiempo máximo de finalización de los trabajos se encuentra alrededor de cuatro a veintitrés días por la limitación que supone el operario dentro del sistema.	Disminuir el tiempo máximo de finalización en un 20% al secuenciar las ordenes de manera continua y requerir la atención de la monitorea durante intervalos específicos.			
Objetivo general (Goal statement)					
Diseñar una metodología de secuenciación para reducir el número de trabajos tardíos en el servicio de impresión 3D del Centro de Automatización de Procesos de la Pontificia Universidad Javeriana Cali mediante la adaptación de modelos y algoritmos de optimización.					
Objetivos específicos (Project scope)					
<ul style="list-style-type: none"> • Definir las restricciones del modelo para abordar el problema de agendamiento de actividades. • Desarrollar la metodología para abordar el problema de agendamiento. • Validar el impacto de la propuesta de diseño mediante una simulación. 					
Plan de Trabajo (Project Plan)				Equipo de trabajo (Team members)	
Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Área IISE	Nombre	Rol
Buscar metodologías que se ajusten al agendamiento de actividades.	04/01/2021	22/02/2021	Investigación y análisis de operaciones.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper
Analizar las restricciones atendidas en la revisión de literatura.	23/02/2021	05/03/2021	Investigación y análisis de operaciones.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper
Establecer restricciones a atender.	8/03/2021	10/03/2021	Investigación y análisis de operaciones.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper
Adaptar la metodología seleccionada.	11/03/2021	26/03/2021	Gestión de ingeniería y operaciones.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper
Realizar manuales para el personal del CAP.	27/03/2021	02/04/2021	Investigación y análisis de operaciones.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper
Medir resultados de los KPI.	02/04/2021	10/04/2021	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper
Comparar los resultados entregados con la situación actual.	10/04/2021	20/04/2021	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper
Determinar si la meta fue alcanzada.	20/04/2021	30/04/2021	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Ana Sofia Ariza Cardona	Gate keeper

II. DEFINIR

A. Contexto y Justificación

La impresión 3D fue creada hace más de 30 años por el empresario Charles W. Hull quien en 1983 ideó el primer método de impresión 3D y en 1984 patentó la primera máquina [1]. No obstante, a comienzos del siglo XXI es cuando esta tecnología tiene mayor acogida para el diseño y creación de artefactos, buscando tiempos de creación/construcción más cortos en el área de medicina, ingenierías, arquitectura, entre otros [2]. La Fig. 1 permite observar el crecimiento de los ingresos que ha tenido la industria desde 1993 hasta el año 2019 en el área de productos y servicios (mediante la barra azul y gris respectivamente) mostrando un pico cercano a los 11900 millones de dólares durante el último año [3], resaltando la importancia de este sector.

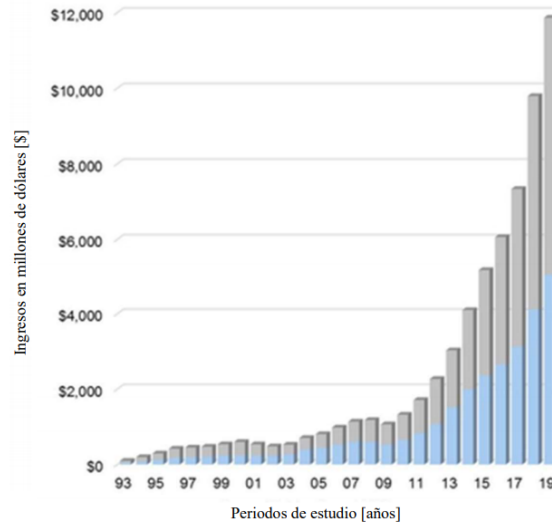


Fig. 1. Ingresos proporcionados por la manufactura aditiva modificado de [3]

El Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) Cali cuenta con un servicio de impresión 3D altamente demandado por estudiantes y profesores de la institución, con un volumen máximo de 171 usuarios atendidos durante el periodo 2019-2 como se ve en la TABLA I. Dicho servicio es realizado por cinco máquinas en cabeza de un monitor, quien se encarga de asistir el proceso durante una jornada de dos horas las cuales reparte de acuerdo a su conveniencia cada día. La atención de pedidos es llevada a cabo en varios pasos, siendo iniciada mediante un correo con las solicitudes que llegan al servicio de impresión autorizadas por el profesor encargado de la asignatura, el archivo a imprimir en formato STL, el nombre del estudiante (dado que cada estudiante está habilitado para usar 100g de material), la carrera a la que pertenece y los detalles importantes para la impresión. Dichos detalles son: el color requerido, las especificaciones de diseño, la utilidad, fecha en la que es requerido y tipo de proyecto (trabajo de grado, semillero, premio o proyecto de clase). Al verificar que estas condiciones sean cumplidas, el monitor agenda la solicitud, mediante el programa “Cura” convierte el archivo entregado por el estudiante a código G para que la impresora pueda leerlo, monta el diseño en la máquina, espera a que la pieza sea impresa y, una vez esta haya sido terminada, le notifica al solicitante que puede pasar a recogerla. Para tener un mayor entendimiento del proceso llevado a cabo, a continuación, es posible observar la Fig. 2 en la que se contempla el flujo que debe recorrer la orden para su materialización.

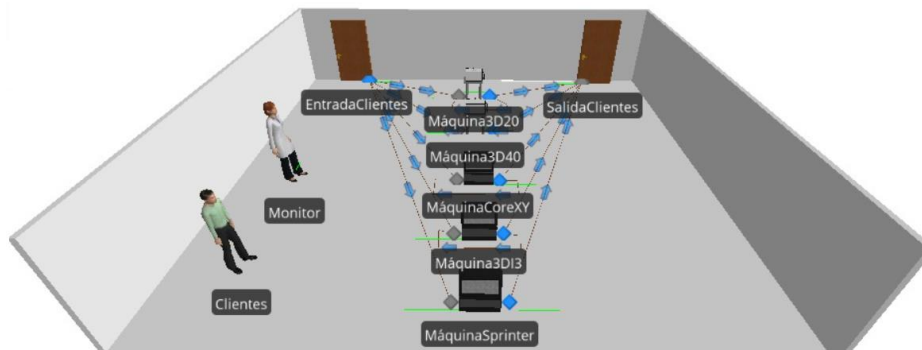


Fig. 2. Diagrama del proceso de impresión 3D del CAP.

Al entrevistar al coordinador del CAP, éste manifiesta que la gestión llevada a cabo actualmente para el servicio de impresión dificulta el cumplimiento de la demanda mediante factores específicos, como:

- ❖ **La atención insuficiente a solicitudes:** en ocasiones se presentan dificultades en la atención de pedidos dado que el CAP contrata monitores por dos horas consecutivas para desempeñar su labor y la media de los tiempos de procesamiento de las órdenes pueden superar dicho intervalo de trabajo [Anexo 8], lo cual limita el número de pedidos que se pueden realizar en una jornada. Además, cuando la monitora se retira del sistema se presentan tiempos de inactividad prolongados en las máquinas que podrían ser aprovechados para la realización de otros pedidos.
- ❖ **La ausencia de un adecuado agendamiento de actividades a desempeñar:** a medida que las solicitudes llegan empiezan a ser atendidas siguiendo una regla de prioridad FIFO (primero que llega, primero que sale), es decir, la monitora al empezar su turno de dos horas organiza los pedidos de acuerdo con la fecha de recepción más temprana, los parametriza y ejecuta, dejando de lado los plazos de entrega establecidos por el usuario y las demás solicitudes que aún tiene por revisar. Esto tiende a producir tardanza en la entrega de proyectos de impresión y compromete la fidelidad de los usuarios.
- ❖ **La recepción deficiente de pedidos:** debido a la alta demanda del servicio durante la semana de parciales [Anexo 8] y la falta de conocimiento sobre las especificaciones de impresión que los usuarios deben registrar en los correos, se dificulta la clasificación de pedidos pendientes (especialmente cuando los correos llegan sin remitente, autorización u otros requisitos necesarios), lo que genera que existan pedidos atrasados o que sean realizados con las especificaciones que la monitora considere apropiadas.

Para conocer la proporción de usuarios satisfechos con el servicio, mediante (1) se realizó un cálculo de muestra infinita n_0 con base a un nivel de confianza del 95% ($Z = 1.96$), un error máximo permitido (ϵ) del 11,68% y una probabilidad de ocurrencia (p) del 50%. Además, se aplicó un factor corrector a la muestra en (2), dada la magnitud finita de la población que hace parte de la comunidad Javeriana ($N = 1115$ estudiantes). Para establecer este tamaño, se accedió al número de estudiantes durante el periodo 2020-2 gracias al programa de Ingeniería Industrial, estos son: Ingeniería Mecánica (35 estudiantes), Ingeniería Electrónica (185 estudiantes), Ingeniería Industrial (419 estudiantes), Ingeniería de Sistemas (181 estudiantes) y Diseño de la Comunicación Visual (295 estudiantes). De esta forma, se determinó que el tamaño de muestra n al que tendría que ser realizada la encuesta era de 66 usuarios.

$$n_0 = \frac{(Z)^2(p*(1-p))}{\epsilon^2} = \frac{(1,96)^2(0,5*(1-0,5))}{0,1168^2} = 70 \tag{1}$$

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{n_0}{N}\right)} = \frac{70}{1 + \left(\frac{70}{1115}\right)} = 66 \tag{2}$$

Al examinar los resultados de la encuesta fue posible encontrar que el 64,7% de usuarios regulares se encuentran satisfechos con el servicio. No obstante, los clientes restantes manifestaron problemas en la atención [Anexo 1]. En la Fig. 3 se observan las principales razones de inconformidad que manifiestan los usuarios insatisfechos. En primer lugar, se identifica un alto porcentaje de usuarios que perciben atrasos frente a las fechas de entrega estipuladas. Además, se observan problemas en la velocidad de atención de solicitudes, la información que los usuarios deben suministrar en el correo para el envío de sus requerimientos y el tener que acudir a otros centros de impresión 3D diferentes al CAP debido a la falta de disponibilidad de impresoras en el sistema.

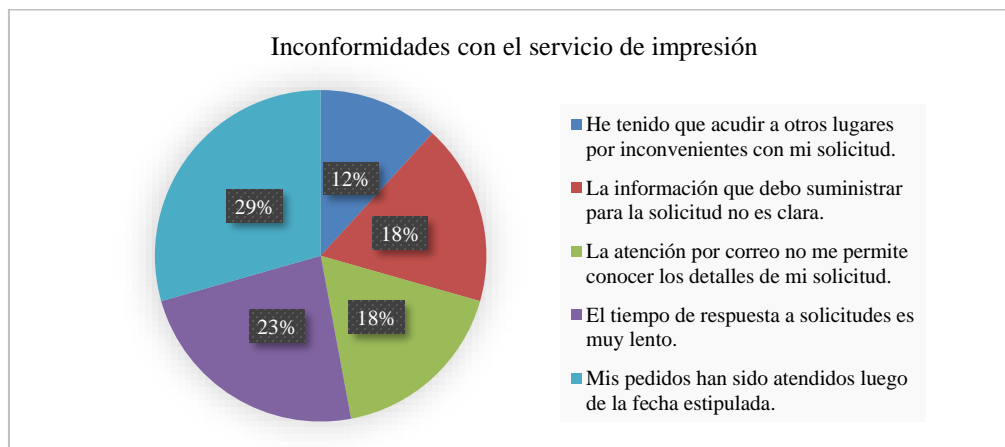


Fig. 3. Inconformidades detectadas en el servicio de impresión.

Al observar la TABLA I es posible notar que el problema potencialmente se presenta dado el aumento de tráfico de usuarios en el sistema durante las semanas de parciales, al constituir por encima de la mitad de consumidores que se registran durante el periodo completo de evaluación. Es pertinente resaltar que el incremento de demanda presentado en el semestre 2019–2, se debe a que es el único periodo donde se ha registrado un semestre académico completo (tomando en consideración los tres periodos de parciales), los demás únicamente incluyen los periodos resaltados en el [Anexo 8], es decir, tercer periodo de parciales para el semestre 2019-1 y primer periodo de parciales para el semestre 2020-1.

TABLA I
DEMANDA DEL SERVICIO DE IMPRESIÓN 3D

Periodos académicos	Demanda del servicio durante el semestre académico	Demanda del servicio durante semanas de parciales	Porcentaje de clientes atendidos durante semana de parciales
2019-1	52	31	59,62%
2019-2	163	85	52,15%
2020-1	17	10	58,82%

Con este panorama, el servicio de impresión 3D del CAP en la Pontificia Universidad Javeriana seccional Cali presenta problemas en la gestión de información y el proceso llevado a cabo, generando en el peor escenario un 71,42% de trabajos tardíos [Anexo 16] y una tardanza de siete días en la entrega de proyectos de impresión, lo que provoca 35,3% de usuarios insatisfechos con el servicio [Anexo 1]. Así que, vale la pena realizar este proyecto, ya que el Centro de Automatización de Procesos posee en su Misión brindar un servicio de calidad a toda su comunidad. Además, es importante desarrollarlo ahora ya que la universidad incurrió en un alto costo de inversión, mantenimiento, herramientas, entre otros [Anexo 2] para que este servicio se preste de manera adecuada.

El beneficio principal del proyecto es desarrollar una propuesta de mejora que permita al CAP realizar un agendamiento de las actividades a ejecutar para entregar la mayor cantidad de pedidos antes del plazo de entrega acordado con el usuario. El beneficio potencial de la propuesta permitirá al CAP prestar un servicio de impresión más competitivo, que satisfaga los requerimientos de los usuarios y permita captar nuevos clientes en un futuro.

B. Grupos de interés

Derivado del planteamiento del problema, se determinaron los grupos de interés y el impacto de cada uno de ellos en el proyecto. La matriz poder vs interés en la TABLA II fue utilizada para la clasificación y priorización de *stakeholders*. Además, la verificación de las ponderaciones se realizó en una reunión con el coordinador del CAP para comprobar la importancia de los interesados frente al proyecto (0 más baja y 10 más alta). Por último, para determinar la prioridad y el puntaje obtenido de cada uno, se utilizó la Hoja de Trabajo de Grupos de Interés [Anexo 3].

TABLA II
MATRIZ DE PODER VS INTERÉS DE LOS STAKEHOLDERS

Metodología			Matriz poder vs Interés			Prioridad	
Grupo de Interés	Definición	Impacto	Poder	Interés	Clasificación	Puntaje	Prioridad
Personal CAP	Controla y monitorea el proceso de impresión 3D.	Impacto positivo, la propuesta les permitirá organizar el tiempo de la monitora y reducir el nivel de inconformidad de los usuarios con el servicio.	8	10	Gestionar atentamente (primer cuadrante).	16	1
Profesores	Propone actividades de impresión y puede ser cliente final.	Impacto positivo, podrán acceder al servicio adecuadamente y dejar trabajos a los estudiantes sin percances.	9	4	Mantener satisfecho (segundo cuadrante).	9	2
Estudiantes	Clientes finales del servicio ofrecido por el CAP.	Impacto positivo, podrán acceder al servicio adecuadamente.	6	10	Gestionar atentamente (primer cuadrante).	9	3
Monitora del CAP	Encargada de llevar a cabo los pedidos y aprobar solicitudes.	Impacto positivo, al hacer uso de la metodología podrá desempeñar los proyectos de impresión para entregarlos en el tiempo previsto.	2	7	Mantener informado (cuarto cuadrante).	7	4

En la TABLA II se observa un empate entre el puntaje de profesores y estudiantes, por lo cual se designa a los profesores en la segunda prioridad, pues además de ser usuarios del sistema, son encargados de asignar actividades de impresión 3D a estudiantes. Así, en la Fig. 4 se presenta el gráfico resultante de la Matriz de Poder vs Interés de las partes interesadas de acuerdo con su clasificación, mostrando que se debe gestionar atentamente al personal del CAP y a los estudiantes, mantener informado a la monitora y satisfechos a los profesores.

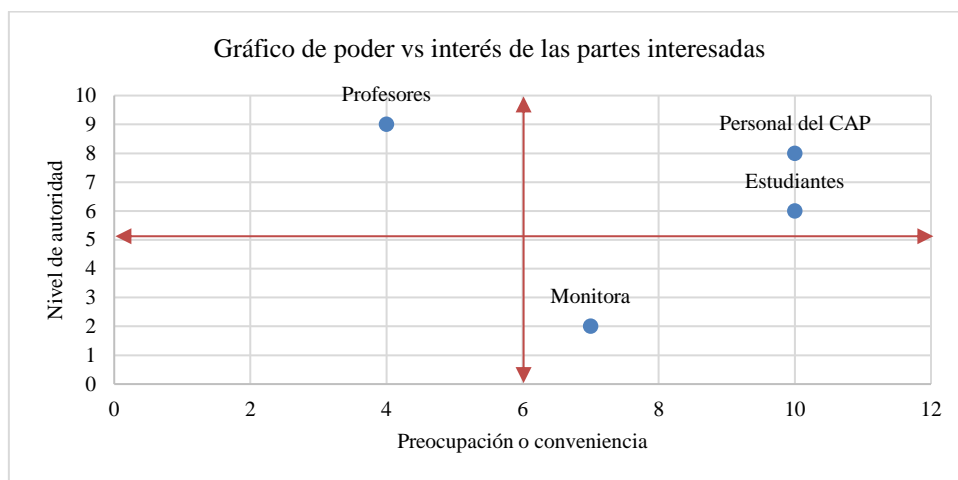


Fig. 4 Gráfico de poder vs interés de los Stakeholders representada en plano cartesiano.

C. Requerimientos

Es de gran importancia reconocer y estudiar los requerimientos de cada parte interesada con el objetivo de cumplir sus necesidades, teniendo en cuenta las normas y leyes que pueden restringir el alcance del proyecto para determinar qué acciones correctivas se pueden implementar. De esta forma, se realizó una reunión con el coordinador del CAP [Anexo 4] para determinar las necesidades de cada grupo de interés, transformarlas en requisitos, y establecer las variables sujetas al proceso, restricciones y especificaciones de diseño, las cuales son descritas en la TABLA III.

TABLA III
REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO DE IMPRESIÓN 3D EN EL CAP RESPECTO A LOS INTERESADOS

Grupos de interés	Requisitos	Variable	Restricción de Diseño	Especificación de Diseño	Leyes y Normas	Importancia o Efecto de las leyes
Personal del CAP	Determinar las actividades que la monitora debe desempeñar para cumplir con la demanda.	Número de trabajos tardíos y tiempo de finalización de trabajos.	La atención de pedidos se ve limitada debido a la contratación de monitores durante dos horas consecutivas.	Mantener el correcto funcionamiento del CAP propiciando la oportuna atención de las solicitudes de impresión.	Contrato de monitora establecido por la Pontificia Universidad Javeriana Cali	Definir los roles que debe desempeñar y los objetivos a cumplir.
Profesores	Recibir sus proyectos de impresión conforme al plazo establecido teniendo en cuenta los límites mínimos de atención del CAP (dos a doce días).	Número de trabajos tardíos.	El plazo de entrega planteado por el profesor debe considerar la disponibilidad del CAP para realizar la entrega de pedidos. De lo contrario el estudiante no optara por realizar su solicitud en las instalaciones.	Recibir el trabajo solicitado dentro del plazo de entrega definido por el CAP con la calidad adecuada y el cumplimiento de sus requerimientos.	Reglamento del profesor estipulado por la Pontificia Universidad Javeriana Cali.	Definir los roles a desempeñar y deberes que se deben cumplir.
Estudiantes	Recibir el proyecto que necesita imprimir, teniendo en cuenta los límites de atención del CAP (dos a doce días).	Número de trabajos tardíos.	El estudiante debe realizar las solicitudes a tiempo. De lo contrario, el CAP no podrá hacerse cargo de la solicitud, pues no contará con la capacidad para atenderla.	Recibir la impresión dentro del plazo y acorde con sus requerimientos, para cumplir con la fecha de entrega propuesta por el profesor.	N/A	N/A
Monitora del CAP	Gestionar las actividades a realizar para cumplir con las solicitudes del CAP en un plazo de dos a doce días.	Número de trabajos tardíos y tiempo de finalización de trabajos.	El tiempo máximo de atención de solicitudes por parte de la monitora son dos horas cada día.	Seguir una adecuada secuencia de actividades para atender las solicitudes de la comunidad javeriana.	Contrato de monitora establecido por la Pontificia Universidad Javeriana Cali.	Definir los roles que debe desempeñar y los objetivos a cumplir.

Aunque la maquinaria utilizada por el CAP en el área de impresión 3D no hace parte de los interesados, es pertinente resaltar que provee restricciones al servicio debido a la capacidad con la que cuenta, ya que cada una posee dimensiones diferentes adaptadas a las necesidades de productos que requieren los usuarios. Esto constituye una limitación a la atención de la demanda, puesto que a medida que el producto a imprimir posea dimensiones mayores, no va a poder ser desarrollado por cierto tipo de máquinas. Del mismo modo, otra característica que lleva a la restricción del servicio es el material admitido por las impresoras, dado que, dependiendo de éste, podrán ser realizados diferentes prototipos.

En el caso de las piezas que requieran resistencia ante fuerzas externas o condiciones específicas de temperatura, será necesario aplicarles material ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). Por otra parte, aquellas que requieran únicamente un aspecto estético deberán ser realizadas en PLA (ácido poliláctico). En la TABLA IV se describen las dimensiones de capacidad de cada máquina, junto a los materiales admitidos por las mismas. Es pertinente recalcar que las máquinas 3D40 y 3D20 poseen una mayor capacidad puesto que estas son fabricadas por una compañía certificada para realizar dicha labor, mientras que las impresoras 3DI3, Sprinter y Core XY son máquinas que han sido creadas dentro de las instalaciones del CAP, actualmente se encuentran en etapa de prueba y mantenerlas activas constantemente podría provocar averíos en las mismas. Por tanto, este estudio se centrará únicamente en las dos primeras máquinas.

*TABLA IV
DIMENSIONES, CAPACIDAD Y MATERIALES ADMITIDOS POR LA MAQUINARIA*

Impresoras	Materiales admitidos para utilizar	Dimensiones (mm)	Capacidad (Horas/semana)
Impresora 3D40	PLA	255x150x170	100
Impresora 3D20	PLA	230x150x140	100
Impresora 3DI3	PLA, ABS	180x190x200	44
Impresora 3D CAP Sprinter	PLA, ABS	200x200x240	44
Impresora 3D CAP Core XY	PLA, ABS	340x340x300	44

III. MEDIR

A. Plan de recolección de datos

Una vez definidos los grupos de interés y los requisitos del proyecto, se realizó el Plan de Recolección de Datos (PRD) [Anexo 5], que tiene como finalidad presentar de manera resumida dónde y cómo se recolectarán las variables necesarias para la etapa Analizar. Para la elaboración de este, se debe reunir información pertinente del sistema con el propósito de obtener datos confiables del proceso llevado a cabo actualmente en el Centro de Automatización de Procesos y conocer su desempeño. Los recursos que se emplearon para la toma de mediciones fueron: bases de datos suministradas por el CAP durante el año 2019 a 2020-1 y formatos de recolección de datos durante el periodo 2020-2.

TABLA V
PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Requisitos	Definición operativa	Aspectos clave	Criterios	Recursos de medición
El proyecto por imprimir debe ser entregado en el tiempo establecido, teniendo en cuenta los límites de atención del CAP (dos a doce días) para cumplir con la demanda pactada.	El proyecto debe ser gestionado para poder ser entregado con la calidad adecuada y en el plazo establecido, dependiendo de su tipo (Regular, Mediano o Grande).	Oportunidad en la entrega.	Para obtener los datos de entrada solo se tuvieron en cuenta las casillas de Excel completamente diligenciadas en la base de datos. [Anexo 8]	Los datos se obtuvieron de la base de datos suministrada por el CAP durante el periodo 2019-1 a 2020-1 y una recolección de datos realizada durante el periodo 2020-1
La atención de pedidos no debe proporcionar espacios de inactividad prolongados que puedan ser aprovechados para la realización de otros pedidos.	Los proyectos de impresión deben ser secuenciados de manera apropiada para no aumentar el tiempo de finalización de los demás por periodos ociosos y aprovechar el tiempo del operario.	Oportunidad en la entrega y Asignación de recurso humano.	Para obtener los datos de entrada solo se tuvieron en cuenta las casillas de Excel completamente diligenciadas en la base de datos. [Anexo 8]	Los datos se obtuvieron de la base de datos suministrada por el CAP durante el periodo 2019-1 a 2020-1, y una recolección de datos realizada durante el periodo 2020-1

Un indicador de rendimiento (KPI) es un medidor de desempeño que se utiliza para sintetizar información, tomar decisiones respecto al estado actual de un proceso, proyecto, estrategia o campaña y definir una línea de acción futura para monitorear el rendimiento de esta. A continuación, la TABLA VI, presenta cada variable de estudio, conforme al plan de recolección de datos realizado.

TABLA VI
INDICADORES DE DESEMPEÑO

Variable	Objetivo	Descripción	Indicadores
Número de trabajos tardíos. [Trabajos]	Es útil para identificar la cantidad de trabajos entregados luego de su plazo de entrega y realizar un paralelo al implementar la propuesta de mejora.	La variable fue obtenida mediante el Anexo 10 y 11, así como una simulación Montecarlo desarrollada en Excel, penalizando los trabajos que fueron entregados luego de su plazo de entrega.	$Trabajos\ tardíos = \sum_{n=0}^{N-1} U_n \quad (3)$ $U_n = 1\ si\ el\ trabajo\ n\ esta\ atrasado$
Tiempo máximo de finalización [Días]	Permite examinar el tiempo que toma la realización de los pedidos actualmente de acuerdo con el horario del operario y compararlo al desarrollar la propuesta de mejora.	La variable fue obtenida mediante el Anexo 10 y 11, así como una simulación Montecarlo desarrollada en Excel, obteniendo el máximo tiempo de finalización de distintas instancias.	$Makespan = Max(C_n) \quad (4)$ $C_n = Tiempo\ de\ finalización\ del\ trabajo\ n$

B. Medición del sistema actual

Diagnóstico actual:

Para conocer los detalles del proceso de atención de solicitudes por el CAP, la Fig. 5 muestra un mapa que incluye los procesos estratégicos, operativos y de apoyo que llevan a la entrega final del producto terminado. En esta, se resalta la planificación de pedidos de impresión como una de las actividades más importantes a desempeñar, ya que de esta depende que la demanda pueda ser satisfecha. Por otro lado, para definir los puntos de control y mejora del sistema, se desarrolló un diagrama de flujo [Anexo 6]. En este, se encontró que la falta de conocimiento de cómo agendar las solicitudes, la ejecución de pedidos defectuosos y el desconocimiento de los parámetros requeridos por el estudiante, en ocasiones no permiten continuar con el proceso de impresión.

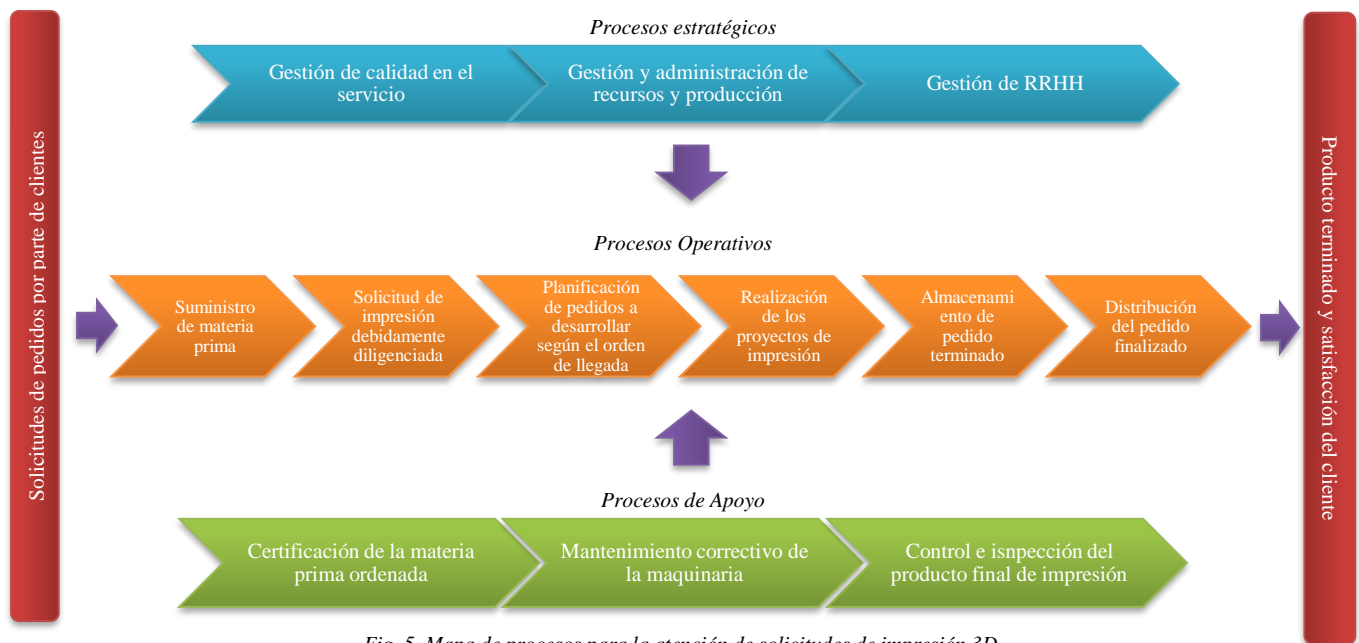


Fig. 5. Mapa de procesos para la atención de solicitudes de impresión 3D.

En el propósito de determinar el panorama actual del servicio se usó la Hoja de Trabajo de Situación Actual [Anexo 7] para recolectar datos sobre el desempeño del proceso y observar el cumplimiento de las expectativas del usuario. Al realizar esto, se encontró que las máquinas más utilizadas para la atención de usuarios durante el periodo 2019 a 2020-1 fueron la 3D40 y 3D20 [Anexo 8] como se refleja en la Fig. 6 puesto que a inicios de 2019 el CAP únicamente contaba con estas y la 3DI3 fue incorporada luego. Es pertinente aclarar que la impresora 3D CAP Core XY y la 3D CAP Sprinter no se tuvieron en cuenta en el estudio puesto que hasta el momento no han sido utilizadas para la realización de pedidos.

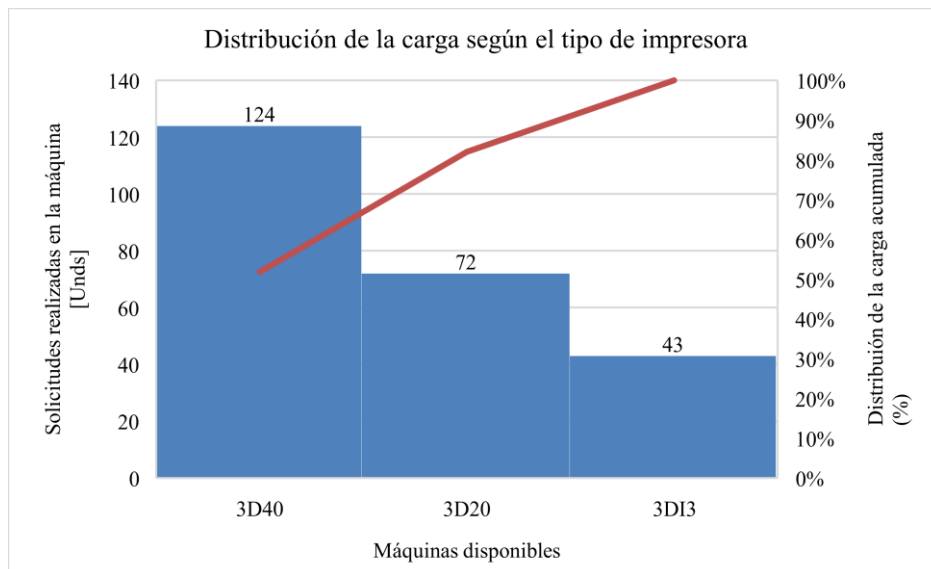


Fig. 6. Distribución de la carga según el tipo de impresora 3D.

El porcentaje de pedidos que no fueron atendidos dentro del CAP durante los periodos académicos de 2019 a 2020-1 constituyeron un 2,71%. Estos pedidos tuvieron que ser atendidos por la monitora en otras instalaciones dentro de la Universidad como lo son el Laboratorio de Electrónica y Arquitectura. El porcentaje de pedidos que presentaron problemas en su ejecución durante el año 2019 a 2020-1 fue del 3,35% [Anexo 8] debido a: rupturas en las piezas, interrupciones por parte del programa, impresiones con dimensiones superiores al promedio, problemas en el calentamiento del material e inconvenientes en la nivelación de la cama de impresión.

- **Características relevantes para el estudio.**

Para facilitar la medición de los indicadores de desempeño seleccionados, en un principio se decidió agrupar mediante categorías el tiempo de procesamiento de los pedidos realizados durante el periodo 2019 a 2020-1, tal que fuera posible encontrar la frecuencia relativa de cada uno de estos dentro del sistema y conocer el plazo establecido por el Centro de Automatización para responder a la demanda [Anexo 8]. Para esto se consultó con el coordinador del CAP dicha información durante las semanas de parciales (puesto que estas semanas constituyen el periodo de mayor demanda) y se registró en la TABLA VII.

TABLA VII
CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE PEDIDOS SEGÚN EL TIEMPO DE PROCESAMIENTO

Tipo de pedido	Tiempo de procesamiento [horas]		Plazo de respuesta [días]	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	Límite inferior	Límite superior			
Regular	0	5	[2,12]	182	70,5%
Mediano	5	10	[3,12]	52	20,2%
Grande	10	20	[7,12]	24	9,3%

Al examinar la información suministrada por el CAP se encontró como indicador de tendencia central [Anexo 8] una mediana referente a 2,78 horas con respecto a los tiempos de procesamiento (es decir, dos horas y 45 minutos) ya que esta magnitud no sigue una distribución normal. Por otro lado, al estimar el tiempo promedio de desfase del programa que realiza la conversión de formato STL a código G (Cura) y el tiempo de procesamiento real de un pedido, con un nivel de confianza del 95% se encontró que este constituye 20,72 minutos (con un error máximo permitido de cuatro minutos). Asimismo, al considerar el tiempo de montaje, parametrización y desmontaje de la pieza, con un nivel de confianza del 95% se obtuvo que estos eran cinco minutos (con un error máximo de 3,58 minutos) y 1,63 minutos (con un error máximo de 0,912 minutos), respectivamente [Anexo 10]. Esto permite afirmar que en promedio el tiempo regular de realización de un pedido oscila en tres horas y 12 minutos, aunque, dada la acumulación de pedidos durante la semana de parciales estos pueden tardar más.

Teniendo en cuenta que la tardanza en la entrega de pedidos constituye un factor de gran importancia en el servicio de impresión 3D debido a su impacto en la satisfacción del cliente, a partir del [Anexo 11] es posible observar la descripción general de un modelo de simulación en SIMIO desarrollado para determinar dicha magnitud. Para el desarrollo del modelo se incluyeron las máquinas 3D20 y 3D40 (puesto que en ellas es donde se distribuye la mayor carga de trabajo y actualmente son las que siguen operando). Fueron utilizados los tiempos de impresión y la demanda desde el año 2019 hasta el período 2020-1 [Anexo 8], así como los tiempos de parametrización, montaje y desmontaje expuestos anteriormente. Además, se tuvo en cuenta que la monitora desempeña sus actividades dos horas al día de lunes a viernes y se simuló un horario de trabajo para facilitar el análisis, dado que esta no cuenta con una agenda de trabajo específica. De esta forma, mediante las simulaciones se obtuvo que la tardanza en la atención de pedidos durante el periodo 2019 a 2020-1 se ubica en un rango de uno a siete días. Además, se observó que el porcentaje de utilización de las máquinas 3D20 y 3D40 es de 6,39 % a 12,15% y 9,80% a 18,78% respectivamente, mientras que la utilización del operario ronda entre un 5,66% y 28,03%.

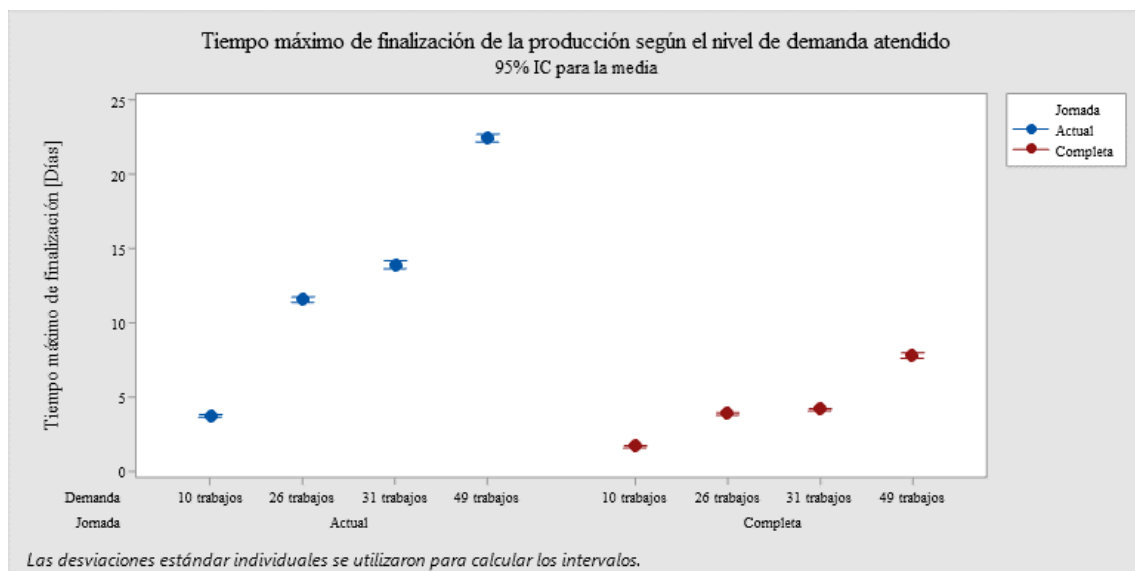


Fig. 7. Gráfico de intervalos del tiempo máximo de finalización de la producción según la jornada y el nivel de demanda atendido

Como efecto de la limitación que supone el operario dentro del sistema, en la Fig. 7 es posible encontrar que, al contemplar el intervalo de trabajo actual del monitor, se detecta un tiempo promedio máximo de finalización correspondiente a 4, 12, 14 y 23 días para cada nivel de demanda evaluada (niveles que hacen alusión a la demanda alcanzada durante diferentes periodos entre 2019 a 2020-1). Este tiempo disminuye dramáticamente al considerar una jornada de atención completa, redondeando dos, tres, cuatro y ocho días para las mismas instancias. También al realizar una simulación Montecarlo [Anexo 16] se reafirma que el tiempo utilizado por la monitora en actividades que agregan valor está por debajo del 30% de las horas pactadas, lo cual implica que la monitora asista durante intervalos de trabajo de baja duración (dos horas) para realizar actividades que constituyen menos del tiempo para el que fue contratada (siete minutos de parametrización, montaje y desmontaje por solicitud) y los pedidos que deban ser realizados no puedan ser atendidos en su totalidad debido a sus altos tiempos de procesamiento. Vale recalcar que, para efectos del ejercicio, en el [Anexo 16] el promedio de cargues-descargue en un día es tomado en el peor de los casos. Por ejemplo, esto corresponde al caso en el cual el monitor debe asistir para desmontar únicamente una máquina y volverla a cargar con otro elemento, sin considerar que un instante de cargue-descargue pueda coincidir con otro y ambas máquinas puedan ser cargadas y descargadas al tiempo (lo que podría ahorrar tiempo). Al comparar estos resultados usando la jornada completa [Anexo 17] es posible observar que la utilización del operario aumenta casi al 50%, lo que se traduce en siete a nueve visitas al CAP independiente que los trabajos sean entregados a tiempo o no.

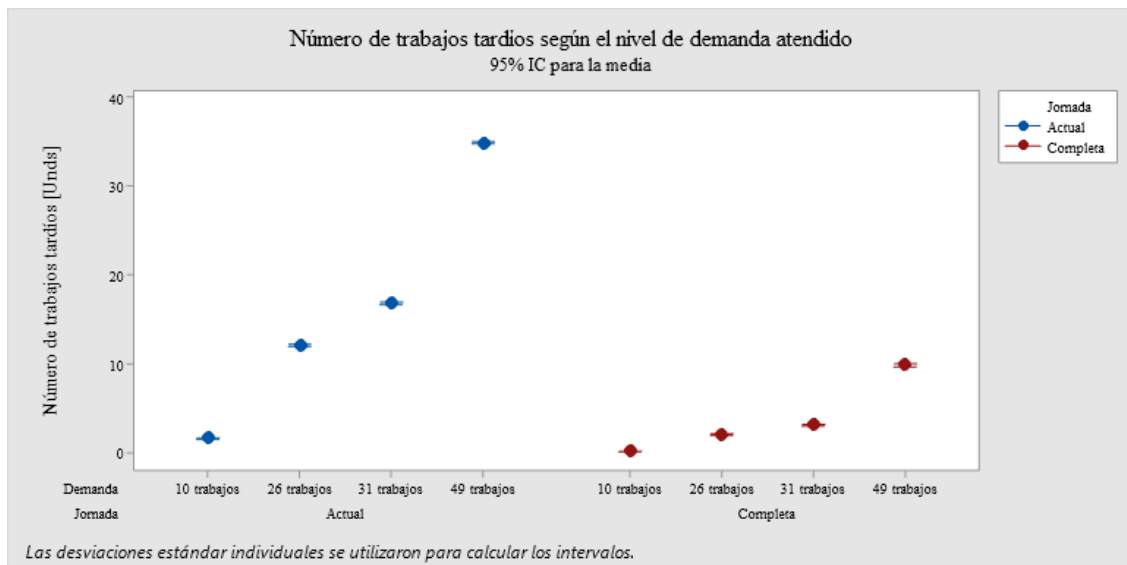


Fig. 8. Gráfico de intervalos del número de trabajos tardíos según la jornada y el nivel de demanda atendido

La Fig. 8 muestra que durante el periodo de parciales el número de trabajos tardíos en el sistema crece a medida que las solicitudes de impresión lo hacen. Al contemplar el escenario de mayor demanda (49 trabajos) con la jornada de atención actual se producen en promedio 35 solicitudes atendidas luego de su plazo, es decir, alrededor del 71,42% de los pedidos son entregados tarde cuando el operario desempeña sus actividades durante dos horas [Anexo 16]. Por otro lado, al simular una jornada de atención completa 10 solicitudes son entregadas luego de su plazo, lo que equivale a 20,41% de trabajos tarde (lo cual en contraste con el escenario anterior muestra un panorama favorable). Finalmente, al conocer las condiciones a las que se enfrenta el CAP, por medio de la TABLA VIII se muestran los resultados de los KPI y la meta por alcanzar.

TABLA VIII
RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

Variable	Actualidad	Meta
Número de trabajos tardíos. [Trabajos]	En la actualidad, de acuerdo con el número de trabajos ordenados en las semanas de parciales, se presenta un porcentaje de trabajos tardíos entre el 16,01% y 71,42 %.	Reducir la cantidad de trabajos tardíos de forma que para el mayor nivel de demanda atendida por el CAP el porcentaje de trabajos entregados luego de su plazo sea inferior al 71,42%.
Tiempo máximo de finalización [Días]	El tiempo máximo de finalización de los trabajos se encuentra alrededor de cuatro a veintitrés días por la limitación que supone el operario dentro del sistema.	Disminuir el tiempo máximo de finalización en un 20% al secuenciar las ordenes de manera continua y requerir la atención de la monitora durante intervalos específicos.

IV. ANALIZAR

A. Análisis de Causas

Una vez finalizada la recolección de datos e indicadores evaluados en la etapa Medir, fueron analizadas las fuentes de variación y causas principales que contribuyen a la brecha entre la situación actual y la deseada en relación con la prestación del servicio de impresión 3D. Para ello se realizaron dos estudios de correlación múltiple, en los cuales se mantuvo constante los siguientes parámetros: recuento de línea de pared, temperatura, velocidad de impresión, velocidad del ventilador y soportes, los cuales el CAP mantiene fijos para los diferentes tipos de pedidos que se reciben a diario. Los valores de dichos parámetros son 3, 220 °C, 60 mm/s, 80% y 80°, respectivamente. De esta forma, para describir el tiempo de procesamiento, en el primer estudio se tuvo en cuenta el gramaje del pedido, el color, la impresora utilizada y los reportes de fallas encontradas [Anexo 9]. Para el segundo se tuvo en cuenta la altura de capa, espesor superior e inferior, porcentaje de relleno, grosor de la pared, dimensiones de las piezas, volumen ocupado, área ocupada y área desperdiciada [Anexo 12]. Al realizar estos análisis, se encontró que ninguno de los modelos permitía realizar estimaciones apropiadas al no cumplir con el supuesto normalidad, aleatoriedad e independencia.

Debido a esto, se procedió a realizar un último análisis de regresión entre volumen ocupado y el tiempo total de impresión [Anexo 12], encontrando una correlación alta positiva de 80,39% entre las variables y un comportamiento que sigue un modelo polinómico. Al cumplir con los supuestos del ANOVA (Normalidad, igualdad de varianzas y aleatoriedad e independencia) se afirmó que el modelo es confiable y la variable volumen ocupado describe la variación en el tiempo de procesamiento en un 64,62%. No obstante, el 35,38% restante se debe a otros factores que no evaluados (es pertinente aclarar que los estudios anteriores fueron desarrollados antes de registrar el nuevo objetivo de optimización; sin embargo, permiten obtener un mayor entendimiento del panorama). Para identificar la causa potencial que genera atrasos en la entrega de pedidos durante la semana de parciales, en compañía del coordinador del Centro de Automatización de Procesos se desarrolló una lluvia de ideas para registrar la mayor cantidad de causas asociadas al problema, y así realizar el diagrama de causa y efecto.

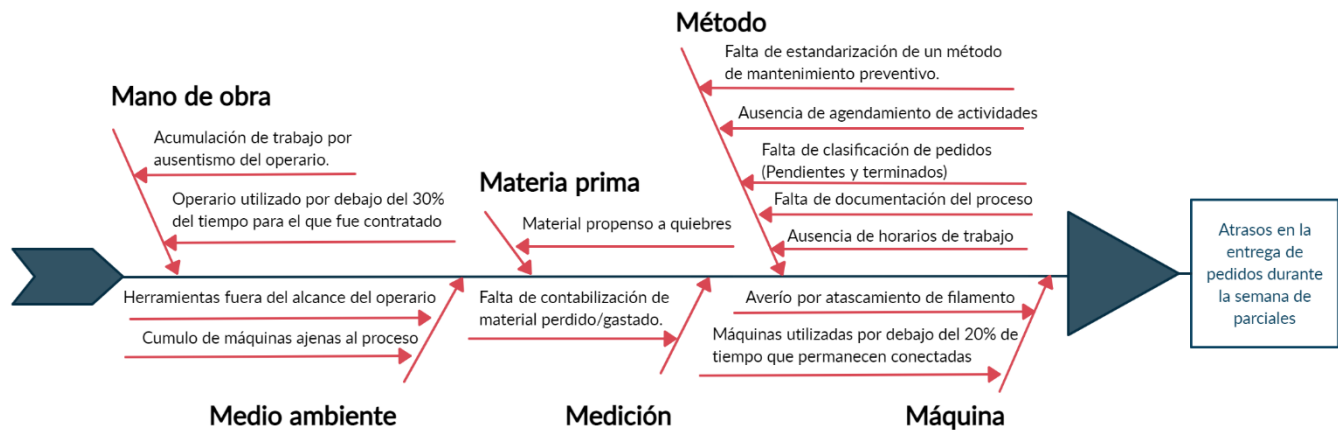


Fig. 9. Diagrama de Causa y Efecto para el servicio de impresión 3D en el CAP.

La Fig. 9 ilustra diversos factores que afectan la ejecución de los pedidos, a partir de su correspondiente clasificación en las 6M (Mano de obra, Materia prima, Métodos, Medio ambiente, Medición y Maquinaria). En cuanto a la mano de obra, fue posible encontrar que la monitora es el recurso más importante en el proceso de impresión 3D, ya que recibe las solicitudes de los clientes, calibra las máquinas, parametriza las piezas, verifica el correcto funcionamiento de la impresora 3D y desmonta los ordenes cuando han finalizado. No obstante, el tiempo mediante el cual desarrolla actividades que agregan valor al producto constituye menos del 30% del tiempo para el que fue contratada. Es decir, en el contrato de la monitora se estipulan dos horas de trabajo. Sin embargo, independiente de que existan atrasos en la entrega de pedidos o no, la monitora desempeña sus actividades de trabajo durante un promedio de 21 minutos, lo cual significa que está actualmente asiste durante intervalos de trabajo de baja duración para realizar actividades que constituyen menos del tiempo para el cual fue contratada, lo que no solo atrasa el proceso, sino que representa que no puedan ser desempeñados otros trabajos [Anexo 11 y 16].

La falta de estandarización de un método de mantenimiento hace que los operarios manipulen constantemente las máquinas realizando cambios en las piezas y utilizando herramientas distintas a las que son suministradas por la fábrica (como un taladro para retirar el filamento atascado), lo cual genera un flujo inadecuado de filamento, potenciales riesgos en el operario si este no realiza las actividades de forma cuidadosa y la necesidad de tener que reprocesar una orden.

El material utilizado para la impresión es un termoplástico delicado que debe tener un cuidado apropiado para maximizar su vida útil. Por esto, debe permanecer sellado en cajas cerca de un deshumidificador el cual retire todo tipo de humedad que pueda afectarlo. A pesar de que se cuentan con estos protocolos de cuidado, el material es propenso a quiebres cuando el rollo se va terminando, debido a que al final del carrete se encuentra más compacto. Esto genera que la máquina se detenga al no recibir más material y si el pedido no ha sido terminado, tenga que volver a ser realizado.

El puesto de trabajo designado para la impresión 3D se encuentra desorganizado afectando el medio donde el operario realiza sus actividades. No se cuenta con las herramientas necesarias a la mano, ya que estas deben ser compartidas con otros procesos que se llevan a cabo en el CAP. Además, debido a la pandemia, dentro del espacio dedicado a la impresión se encuentran situadas máquinas ajenas al proceso y las cajas donde se guarda filamento están ubicadas en el piso, lo que genera que el operario tenga interrupciones al desplazarse. Por otro lado, las máquinas poseen una utilización menor al 20% [Anexo 16] lo que limita la atención de pedidos y al no poder ser desconectadas genera energía recibida no aprovechada.

Por último, se encontró que el personal del CAP no cuenta con un método establecido para realizar sus actividades, ni detalla un horario o cronograma de pedidos a realizar, por lo cual la monitora asiste al CAP para realizar las impresiones cuando puede durante las dos horas pactadas. Tampoco se realiza una distinción entre pedidos pendientes y terminados, ni es posible cumplir con los plazos de entrega de manera confiable debido a que no se planifica, documenta, ni se genera trazabilidad del proceso. Asimismo, no se contabiliza el material perdido o consumido debido al trámite que representa hacer solicitudes de compras (como pilas para una balanza), por lo que tampoco se realizan adecuadas proyecciones de material a adquirir, lo que afecta negativamente el proceso al sobrepasar la cantidad necesaria de compra o no alcanzar el material requerido. Al analizar los factores anteriores se utilizó la herramienta de los “Cinco ¿Por qué?” para identificar la causa raíz del atraso en la entrega de pedidos durante la semana de parciales, en donde se parte del efecto y se generan preguntas hasta llegar a la conclusión o la solución del problema, como se observa a continuación:

- ¿Por qué hay atrasos en la entrega de pedidos?
Porque existen periodos en los que se acumula el trabajo.
- ¿Por qué existen periodos en que se acumula el trabajo?
Porque en las fechas de parciales el operario no se encuentra en el puesto de trabajo.
- ¿Por qué el operario no se encuentra en el puesto de trabajo?
Porque no existen horarios establecidos.
- ¿Por qué no existen horarios establecido?
Porque no se sabe cuándo se requiere al operario.
- ¿Por qué no se sabe cuándo se requiere al operario?
Porque no se ha optado por desempeñar un agendamiento de las actividades a desarrollar para cumplir con los plazos de entrega.

En conclusión, la causa raíz del problema recae en el Método actualmente utilizado por el CAP para la ejecución de pedidos, tal que la falta de un agendamiento de actividades a desempeñar y un horario de asistencia con el cual la monitora ajuste su tiempo para cumplir con las órdenes y entregarlas a tiempo genera atraso en la entrega de pedidos.

B. Revisión de literatura

El agendamiento de actividades permite realizar una correcta asignación de tareas a un horario de trabajo, de manera que estas no se superpongan y cumplan con un objetivo de optimización. La Fig. 11 permite observar el crecimiento de las publicaciones en problemas de optimización dentro de la industria de la manufactura aditiva desde el año 1994 hasta el 2020 a nivel mundial, de forma que la notación -/-/ en la primera casilla indica el número de conjuntos (*batches*) donde serán alojados los productos, la segunda el número de combinaciones de productos dentro de una misma cama de impresión (en el caso de no existir *batches* este indica el número de proyectos de impresión a realizar) y el tercero el número de máquinas disponibles en el sistema, tal que M hace referencia a múltiples, S a únicamente una y – no aplica.

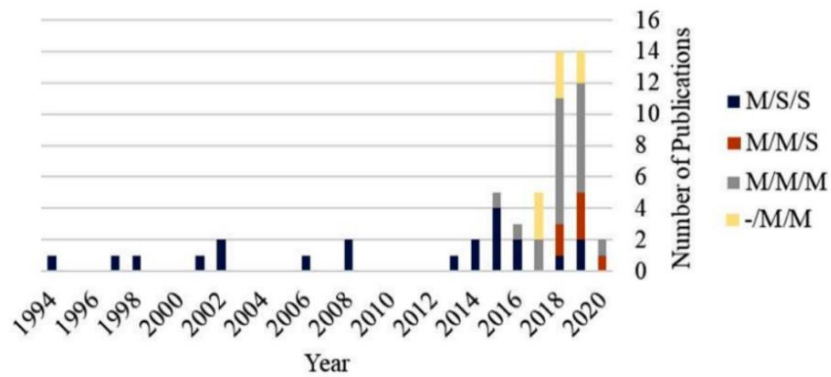


Fig. 10. Publicaciones realizadas en el área de la manufactura aditiva modificado de [33]

El objeto de estudio del presente proyecto se enfoca en la notación $-/M/M$ la cual hace referencia a múltiples actividades y máquinas, y su objetivo de optimización es el de disminuir el número de trabajos tardíos. Por tanto, para el desarrollo de la revisión de literatura se utilizó el método de revisión sistemática de literatura (SLR) para la búsqueda de artículos y *Journals* publicados en *ACM Digital Library*, *IEEE EXPLORE*, *EBSCO*, *IOP Science*, *Science Direct* y *SpringerLink*. Estos artículos, fueron seleccionados debido a la afinidad con el tema y su calidad. Como resultado de la búsqueda [Anexo 13], a continuación, se presenta la revisión de literatura realizada:

TABLA IX
RESUMEN REVISIÓN DE LITERATURA

Título	Autor (es)	Año	Objetivo	Método	Resultados	Aporte para el Proyecto
<i>An n Job, One Machine Sequencing Algorithm for Minimizing the Number of Late Jobs</i>	J. Michael Moore	1968	Disminuir de manera óptima la cantidad de trabajos tardíos a ser procesados dentro de una máquina.	Ordenar los trabajos de acuerdo con la regla EDD, buscar desde la primera posición de la secuencia hasta el primer trabajo que viola su plazo de entrega el que posea un mayor tiempo de procesamiento, eliminarlo y continuar con el proceso hasta que todos los trabajos sean agendados. [5]	Una secuencia de trabajos con la menor cantidad de pedidos atrasados dentro de una máquina. [5]	Conocer la base de la problemática asociada al agendamiento de trabajos para obtener un mínimo número de trabajos tardíos.
<i>Minimizing the Number of Tardy Jobs in Identical Machine Scheduling</i>	Gürsel A. Süer; Eduardo Báez; Zbigniew Czajkiewicz	1993	Disminuir la cantidad de trabajos tardíos a ser procesados dentro de m máquinas.	El artículo propone tres heurísticas para resolver una extensión del algoritmo de Moore en m máquinas paralelas, realiza comparaciones entre el comportamiento de su algoritmo con relación a seis versiones de la heurística propuesta por Ho y Chang en la primera versión del artículo y proporciona el modelo de programación lineal entera óptimo para la resolución del problema. [6]	Con base en los resultados obtenidos para pequeñas instancias, los autores concluyen que las heurísticas S-B-C 3 y S-B-C 2 son las que mejor se comportan con una eficiencia de 94.4% y 93.7% para instancias de 10 trabajos y dos máquinas. Sin embargo, alertan de la necesidad de realizar evaluaciones extensivas con más casos de prueba. [6]	Proporcionar heurísticas para realizar una implementación que permita al CAP entregar el menor número de trabajos tarde al considerar m máquinas paralelas idénticas.
<i>Minimizing the number of tardy jobs for m parallel machines</i>	Johnny C. Ho; Yih-Long Chang	1995	Disminuir la cantidad de trabajos tardíos a ser procesados dentro de m máquinas.	El autor propone cuatro heurísticas, tres de ellas <i>job-focused</i> y la otra <i>machine-focused</i> . El primer enfoque se basa en la asignación de trabajos uno a uno en cada máquina. El segundo realiza la conversión de un problema de m máquinas a m problemas de una máquina para la asignación, pues el algoritmo de Moore ya ofrece optimalidad en tiempo computacional razonable. [7]	Mediante los resultados computacionales, los autores afirman que las heurísticas <i>job-focused</i> funcionan bastante bien para niveles de congestión de [1.5,2.5], sin embargo, H2 lo hace mejor para niveles de [3,5]. En general, las heurísticas propuestas son capaces de resolver problemas de 200 trabajos y 20 máquinas en menos de 10 segundos. [7]	Evaluar el desempeño de una implementación que no solo permita arreglar el problema encontrado en el CAP, sino que ofrezca una estructura eficaz para resolver problemas más grandes.

<i>Minimizing the weighted number of tardy jobs on parallel processors</i>	Rym M'Hallah; R.L. Bulfin	2005	Disminución del número ponderado de trabajos tardíos en m máquinas paralelas idénticas y no relacionadas.	Los autores exponen el modelo de programación lineal entera para resolver el problema de manera óptima y presentan un algoritmo de branch and bound cuyos límites provienen de una relajación resultante de un <i>multiple-choice Knapsack</i> . [8]	Los resultados computacionales muestran que el tiempo de ejecución del algoritmo es relativamente menor cuando no son tomadas en cuenta ponderaciones y máquinas no relacionadas. Además, para instancias con menos de 400 trabajos y dos, cuatro y ocho máquinas no se registraron tiempos de ejecución mayores a 5.17 segundos, lo cual significa que es más rápido que el algoritmo propuesto por Chen y Powell. [8]	Permite evaluar diferentes alternativas a implementar para conseguir tiempos de ejecución menores en el momento que deban ser agendadas las actividades que realiza el CAP.
<i>Parallel-Machine Batch Scheduling to Minimize the Maximum Lateness and the Number of Tardy Jobs</i>	B.M.T. Lin; A.A.K. Jeng	2004	El autor atiende dos objetivos de optimización, la disminución de la tardanza máxima y la cantidad de trabajos tardíos programados en máquinas paralelas habilitadas para procesar más de un producto al tiempo (<i>batch</i>).	Respecto a la disminución del número de trabajos tardíos, el autor propone un algoritmo de programación dinámica y tres heurísticas, la primera utilizando el enfoque <i>machine-focused</i> de Ho y Chang para la secuenciación de un conjunto de máquinas paralelas y luego aplica el algoritmo de programación dinámica de Baker y Kovalyov's para asignar trabajos en cada máquina. La segunda constituye el mismo proceso, sin embargo, toma el enfoque <i>job-focused</i> de los primeros autores. Y la última, constituye una modificación de la segunda para resolver ambos problemas simultáneamente (asignación y agrupación). [9]	De acuerdo con los resultados de la simulación los autores afirman que la programación dinámica toma tiempo exponencial en encontrar una respuesta óptima al problema, por lo que las heurísticas cobran un valor importante. Su tiempo computacional en el peor de los casos puede tomar para H1 y H2 $O(n^3)$ y para H3 $O(n \max \{n, m\})$. Además, frente a los resultados computacionales los autores recalcan el rendimiento en cuanto a tiempo de ejecución y calidad de H1 aun cuando los plazos son ajustados o flexibles. [9]	Garantizar la calidad de las heurísticas propuestas por Ho y Chang, y ofrecer una extensión al problema de secuenciación mediante la agrupación de un conjunto de partes dentro de las máquinas disponibles.
<i>Automating the production planning of a 3D printing factory.</i>	Johan P.N. Freens; Ivo J.B.F. Adan; Alexander Yu. Pogromsky; Hugo Ploegmakers	2015	Agrupar y priorizar el despacho de pedidos que deban ser entregados próximamente para aumentar el rendimiento de una planta de fabricación.	El artículo consta de dos partes, la primera constituye una extensión del <i>One-dimensional bin packing problem</i> al incluir los requerimientos del tamaño de los objetos y su atraso para asignar estos a un <i>batch</i> . La segunda etapa constituye la ubicación de estos dentro de la impresora (la cual se determina a partir de un software de embalaje tridimensional). [10]	La automatización en la planeación de pedidos que debían ser realizados incremento en un 10% el rendimiento de las impresoras y proporcionó tiempos de espera significativamente más cortos. [10]	Permite establecer un método mediante el que sea posible disminuir significativamente el atraso en los pedidos y mantener en un mayor grado la productividad en las máquinas.
<i>Minimizing the weighted number of tardy jobs on multiple machines: A review</i>	M. Adamu; A. Adewumi	2016	Presentar una revisión de literatura para la disminución de trabajos tardíos en diferentes entornos de producción (<i>Parallel machine, Flow shop, Job shop y Open shop</i>)	Los autores describen cada uno de los entornos de producción y clasifican sus categorías (en el caso de <i>Parallel machine</i> explican la categoría de máquinas idénticas, uniformes y no relacionadas), luego muestran una línea temporal de las soluciones propuestas a los problemas acogidos brindando una breve explicación de ellas junto a su complejidad. [11]	Alrededor de 98 citaciones a autores que comprenden el problema de agendamiento de un conjunto de trabajos en m máquinas paralelas para disminuir la cantidad de trabajos tardíos con algunas extensiones (<i>preemption, just-in-time, release dates, etc.</i>). Así como 50 referencias a otros entornos de producción. [11]	Permite generar una mayor comprensión de las dinámicas afianzadas por otros autores hasta el momento y rescatar información relevante para la investigación.
<i>Minimizing the Number of Tardy Jobs on Identical Parallel Machines Subject to Periodic Maintenance</i>	Najat Almasarwah; Yuan Chen; Gürsel Sürer; Tao Yuan.	2019	Disminuir la cantidad de trabajos tardíos en m máquinas paralelas, teniendo en cuenta horarios de mantenimiento preventivo.	El algoritmo utiliza la heurística S-B-C 1 de Sürer <i>et al.</i> [6] para identificar un agendamiento inicial y modifica el cronograma de trabajo teniendo en cuenta el intervalo de mantenimiento. Para esto se calcula el <i>slack time</i> (tiempo de inactividad) para cada intervalo de trabajo en cada máquina, y los trabajos tardíos son reprogramados en el intervalo de inactividad de cada <i>batch</i> (horario de programación). [12]	A partir de los resultados computacionales es posible encontrar que la heurística llega al óptimo en 19 de 54 instancias. [12]	Al considerar intervalos de mantenimiento, permite brindar ideas para otorgar restricciones de disponibilidad al agendamiento.

C. Exploración de ideas y selección de alternativas

Para cumplir con los requerimientos de los grupos de interés a partir de la creación de alternativas de solución factibles, se realizó una exploración de ideas utilizando la técnica de ideación *Reverse Brainstorming*, la cual consiste en proponer una alternativa de mejora, realizar preguntas para empeorar dicha alternativa y convertir sus respuestas de negativas a positivas para seleccionar una opción de mejora.

Como primera alternativa, se propuso desarrollar una metodología de secuenciación de actividades para mejorar el servicio ofrecido por el CAP, para ello la pregunta que se propuso fue: ¿Cómo tener un incorrecto agendamiento de actividades? A ello se respondió: documentar información incompleta, no separar productos pendientes y terminados, no generar prioridad a pedidos que deban ser entregados de manera próxima y no considerar la disponibilidad de operarios ni maquinaria a la hora de comprometerse en la realización de un pedido. De esta forma, mediante las ideas antes expuestas, se destacó como alternativa realizar la implementación de un algoritmo que permita secuenciar las actividades y establecer un cronograma de asistencia del operario a las instalaciones del CAP para realizar impresiones 3D.

Como segunda alternativa, se seleccionó ejecutar un prototipo para dar trazabilidad y fijar tiempos de entrega al usuario, la pregunta que se propuso fue ¿Cómo se puede tener una incorrecta trazabilidad de un pedido? A ello se respondió: evitando notificar a los usuarios cuando ocurren eventualidades, fijando tiempos de entrega que no se asemejan a la realidad y evitando dar detalles del proceso (¿Cuándo empezó?, ¿Cómo va?, ¿Cuándo terminó?). Por lo que se concluyó que, en caso de desarrollar un prototipo de trazabilidad a los usuarios, se les debería notificar cuando sus pedidos estuvieran siendo procesados, si ocurrieron eventualidades en el proceso y si sus fechas de entrega tuvieran que ser reacomodadas. De esta forma, se estableció que la característica más importante para la creación de un prototipo debería ser dar a conocer los detalles de los pedidos.

Como tercera alternativa, se seleccionó el mantenimiento de las máquinas como una posible propuesta para mejorar el servicio ofrecido por el CAP, la pregunta que se propuso fue ¿Cómo se puede tener un mal proceso de mantenimiento preventivo? La respuesta: no fijar periodos de revisión para las máquinas, ignorar la realización de mantenimiento y esperar a que las máquinas se dañen para ser arregladas. Dichas ideas permitieron encontrar que para mejorar la atención de solicitudes podrían ser implementadas revisiones periódicas con el fin de evitar posibles daños, así como utilizar hojas de mantenimiento para determinar un histórico de periodos en los que se realizaron revisiones a las máquinas.

Como cuarta alternativa, se propuso la organización del espacio de trabajo como posible acción para mejorar el servicio ofrecido por el CAP, la pregunta que se discutió fue ¿Cómo se puede tener una mala organización del espacio de trabajo? Se plantea la siguiente respuesta: colocando los productos en cualquier lugar, ubicando las máquinas en espacios donde no se permite el flujo de trabajadores o se deban desplazar a lugares lejanos de su puesto de trabajo y no asignando un espacio para ubicar las herramientas de trabajo requeridas. De esta forma, al conocer los factores que impiden una adecuada organización del espacio de trabajo, se propuso aplicar herramientas como las 5s para lograr una estandarización, orden y limpieza del espacio.

Como última alternativa, se planteó la pregunta ¿Cómo no se debe contratar los operarios? haciendo referencia a la alternativa contratación. Se respondió: realizando contratos verbales o físicos por horas, ignorando el tiempo que debe utilizar el recurso humano para la realización de pedidos y no asignando funciones claras a desempeñar al personal contratado. En base a ello, se propuso realizar una contratación conociendo de antemano la disponibilidad del operario para que no existan inconvenientes en la prestación del servicio.

Para escoger la mejor alternativa, se usó el análisis jerárquico AHP [Anexo 14] bajo cinco criterios: costo, tiempo, facilidad, disponibilidad y confiabilidad. De manera que, al examinar el costo de la propuesta a desempeñar, esta no tenga un valor elevado; el tiempo de ejecución de esta sea corto, puesto que debe ser desempeñada durante un semestre y la rapidez en su implementación es un factor importante; la facilidad significa que la herramienta al ser desempeñada nuevamente por los operarios sea sencilla de utilizar y no provoque una carga. En cuanto a disponibilidad que permita generar un acceso rápido al gestor del proceso durante un periodo pico, para resolver el problema de manera inmediata. Por último, en cuanto a confiabilidad, que genere resultados que puedan ser mantenidos en el tiempo, de manera tal que sirva continuamente al Centro de Automatización de Procesos luego de haber sido desarrollada. Al haber examinado dichos criterios con base en cada alternativa, se determinó que la mejor solución para reducir los atrasos en la entrega de pedidos constituye el diseño de una metodología de secuenciación de actividades que permita organizar los trabajos a desarrollar en el CAP y establecer un cronograma de asistencia del operario a las instalaciones para ejecutarlos.

D. Objetivos

Objetivo general:

Diseñar una metodología de secuenciación para reducir el número de trabajos tardíos en el servicio de impresión 3D del Centro de Automatización de Procesos de la Pontificia Universidad Javeriana Cali mediante la adaptación de modelos y algoritmos de optimización.

Objetivos específicos:

- Definir las restricciones del modelo para abordar el problema de agendamiento de actividades.
- Desarrollar la metodología para abordar el problema de agendamiento.
- Validar el impacto de la propuesta de diseño mediante una simulación.

E. Plan de trabajo (PdT)

Para establecer el plan de trabajo de las actividades a desempeñar, en la TABLA X, se pueden apreciar los objetivos específicos que se deben realizar con sus respectivos entregables junto a las fechas de entrega. Así mismo, en el [Anexo 15], se describe el cronograma en Microsoft Project de este plan de trabajo.

TABLA X
PLAN DE TRABAJO

Objetivo	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	Actividad	Entregable (alcance)	Fecha de entrega
Definir las restricciones del modelo para abordar el problema de agendamiento de actividades.	Investigación y análisis de operaciones.	Investigación de Operaciones.	Buscar metodologías que se ajusten al agendamiento de actividades.	Listado de restricciones a atender mediante la metodología de solución.	22/02/2021
	Investigación y análisis de operaciones.	Investigación de Operaciones.	Analizar las restricciones atendidas en la revisión de literatura.		06/03/2021
	Investigación y análisis de operaciones.	Investigación de Operaciones.	Establecer restricciones a atender.		10/03/2021
Desarrollar la metodología para abordar el problema de agendamiento.	Gestión de ingeniería y operaciones.	Secuenciación de la producción.	Adaptar la metodología seleccionada.	Cuaderno de Jupyter (en Python).	26/03/2021
	Investigación y análisis de operaciones.	Programación	Realizar manuales para el personal del CAP.	Manual de usuario e instalación.	02/04/2021
Validar el impacto de la propuesta mediante una simulación.	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Análisis de trabajo y Enfoque en el cliente.	Medir resultados de los KPI.	Análisis del impacto de la propuesta en el número de trabajos tardíos y el tiempo máximo de finalización.	10/04/2021
	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Análisis de trabajo y Enfoque en el cliente.	Comparar los resultados entregados con la situación actual.		20/04/2021
	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Análisis de trabajo y Enfoque en el cliente.	Determinar si la meta fue alcanzada.		30/04/2021

V. MEJORAR

A. Desarrollo del diseño de la solución

En el propósito de disminuir el número de trabajos tardíos en el Centro de Automatización de Procesos se adoptó la notación $P_m, h \parallel \sum U_n$ para problemas de optimización. El objetivo consiste en asignar un conjunto de $n \in I$ trabajos a $m \in J$ máquinas paralelas idénticas P_m , considerando periodos de mantenimiento preventivo h que en la práctica serán utilizados para restringir la disponibilidad del operario.

Entrada: Colección de trabajos $A[0, \dots, N]$, $N \geq 0$ tal que $A[n]$ contiene la lista $[Job_n, p_n, d_n]$ indicando el nombre Job_n , tiempo de procesamiento p_n y plazo máximo de entrega d_n del trabajo n , $0 \leq n < N$.
Salida: Máxima cantidad de trabajos de $A[0, \dots, N]$ que se pueden elaborar sin violar su plazo límite de entrega.

Para el desarrollo de la metodología únicamente se tuvo en cuenta las máquinas 3D20 y 3D40 como se explica en la sección Definir. Se asume un área de impresión igual, ya que el programa donde se realiza la transición del formato STL a código G posee las dimensiones de la máquina más pequeña utilizada para el desarrollo de proyectos (es decir, la 3D20). Además, el tiempo de procesamiento se tomó de la misma magnitud para ambas máquinas, pues no se posee información suficiente acerca de la velocidad a la que opera una con respecto a la otra y la boquilla de ambas posee las mismas características respecto a diámetro y velocidad, respectivamente 0.4 mm y 120 mm/s. Las restricciones del problema son:

- Los trabajos por programar deben ser recibidos en un periodo inicial (no *release dates*, r_n) con su respectivo plazo de entrega para ser agendados y ejecutados de manera secuencial, contemplando periodos de no disponibilidad, sin interrupciones (*prmp*), ni precedencias (*prec*) para su procesamiento. Además, deberán poseer dimensiones menores a las del espacio de impresión, una única operación a desempeñar y no podrán ser divididos.
- Los tiempos de procesamiento entregados por el programa de impresión para las simulaciones se determinarán conforme a lo establecido en el [Anexo 11]. Además, los tiempos de preparación (*set-up*, s_n y *tear-down*) al ser relativamente bajos (cinco minutos de parametrización y montaje, y dos minutos de desmonte) no se tomarán en cuenta para la programación de las operaciones.

Para el diseño de la propuesta implementamos en [34] el modelo de programación lineal entera propuesto por Süer *et al.* [6] para obtener soluciones óptimas al agendamiento de un conjunto de trabajos en $m \in J$ máquinas paralelas. A partir de la expresión (5) es posible observar el objetivo de optimización, es decir, la maximización de la cantidad de trabajos entregados a tiempo. Las restricciones en (6) plantean que el tiempo de finalización de los trabajos a procesar sea menor al de su plazo de entrega en cada combinación de trabajos y máquinas, el conjunto de restricciones (7) aseguran que cada trabajo $n \in I$ sea procesado dentro de una máquina $m \in J$ y las restricciones en (8) otorgan la condición binaria a la variable de decisión.

Modelo de programación lineal entera propuesto por Süer et al.:

Conjuntos

I Conjunto de trabajos a realizar. $n, z \in I = \{0, \dots, N - 1\}$

J Conjunto de máquinas disponibles. $m \in J = \{0, \dots, M - 1\}$

Parámetros

d_n Plazo de entrega del trabajo n . [Horas]

p_n Tiempo de procesamiento del trabajo n . [Horas]

Variables de decisión

$X_{nm} \begin{cases} 1 & \text{si el trabajo } n \text{ esta a tiempo en la máquina } m. \\ 0 & \text{de lo contrario.} \end{cases}$

Función objetivo

$$\text{Maximizar} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X_{nm} \quad (5)$$

Restricciones

$$\sum_{z=0}^{n-1} p_z * X_{zm} \leq d_n \quad \forall n \in I, m \in J \quad (6)$$

$$\sum_{m=0}^{M-1} X_{nm} \leq 1 \quad \forall n \in I \quad (7)$$

$$X_{nm} \in \{0,1\} \quad \forall n \in I, m \in J \quad (8)$$

Al considerar el carácter intratable (i.e. es NP-Completo) del problema, aun cuando este es reducido a dos máquinas o los plazos de entrega de cada trabajo son iguales, también se implementó la heurística *machine-focused* de Ho y Chang [7]. Esta constituye una extensión del algoritmo de Moore (también conocido como algoritmo de Hodgson), que provee optimalidad cuando se cuenta con una máquina para secuenciar las actividades. Para esto, el problema fue desglosado en dos aproximaciones: la primera implementando el algoritmo de Moore y la segunda adoptando la heurística H2 de Ho y Chang.

Primera aproximación: Implementación del algoritmo de Moore

El algoritmo de Moore provee optimalidad frente al agendamiento de una colección de trabajos que deben ser procesados dentro de una máquina para garantizar la mínima cantidad de trabajos tardíos. Como se puede apreciar en el ALGORITMO I, la colección de trabajos es dividida en un subconjunto de “aceptados”, los cuales serán ordenados primero al constituir aquellos trabajos entregados a tiempo y “rechazados” que podrán ser organizados en cualquier orden dado que no cumplirán con el plazo de entrega pactado. Este problema considera que los n trabajos se encuentran disponibles en el instante inicial de la programación y no permite las precedencias o interrupciones. En el [Anexo 18] se presenta el principio inductivo de Sturm [13] y lema de Jackson [5] para probar la optimalidad del algoritmo frente al enfoque proporcionado por Hodgson e implementado en [34].

ALGORITMO I. PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO DE MOORE

Entrada: Colección de trabajos $A[0 \dots N]$, $N \geq 0$ tal que $A[n]$ contiene la lista $[Job_n, p_n, d_n]$ indicando el nombre Job_n , tiempo de procesamiento p_n y plazo máximo de entrega d_n del trabajo n , $0 \leq n < N$.

Procedimiento:

Ordenar los trabajos de acuerdo con la regla EDD y reconocer dicha secuencia como la actual, tal que $d_0 \leq \dots \leq d_n \dots < d_N$, $Job_0 \leq \dots \leq Job_n \dots < Job_N$. Para cada trabajo organizado de menor a mayor dentro de la secuencia actual.

Si el tiempo de finalización del trabajo anterior junto al de procesamiento del nuevo no sobrepasan el plazo de entrega del trabajo a añadir.

Añadir el trabajo a la lista de trabajos aceptados para ser procesados

De lo contrario,

Revisar la secuencia desde la posición inicial hasta el incumplimiento de la restricción $Job_0 \dots Job_q$, encontrar el trabajo con un tiempo de procesamiento mayor Job_{max} dentro de esta subsecuencia, y añadirlo a la lista de rechazados.

Salidas: Secuencia de la máxima cantidad de trabajos de $A[0 \dots N]$ que no violan el plazo límite de entrega.

Segunda aproximación: Implementación de la heurística H2 de Ho y Chang

Bajo el planteamiento de Ho y Chang, el problema de máquinas paralelas es dividido en M problemas de una máquina, pues como se mostró anteriormente, Moore ofrece optimalidad frente a una máquina. Por lo cual, la primera máquina atenderá los N trabajos, mientras la $M - 1$ se ocupará de los $N - \sum_{m=0}^{M-1} \sigma_m$ trabajos. De esta forma, la máquina adicional siempre agendará de manera óptima los trabajos restantes, aunque esto pueda suponer que en la actual no sean agendados de manera óptima. Por tanto, el autor resalta una serie de condiciones para realizar intercambios entre pares de trabajos agendados y no agendados con el fin de mejorar la secuencia de la máquina, sea S'_m la secuencia en la máquina m antes del intercambio [7]. A continuación, se presenta la notación adicional para entender el algoritmo.

Conjuntos

δ Conjunto de trabajos rechazados.

π Conjunto de trabajos no agendados. $i \in \pi$.

σ Conjunto de trabajos agendados (tempranos). $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2 \cup \dots \cup \sigma_{M-1}$.

Subconjuntos

σ_m Subconjunto de trabajos agendados en la máquina m . $j \in \sigma_m$.

Variables

$b_{[j]}$ Tiempo de inicio del trabajo en la posición j de la máquina m . [Horas]
 $\phi(S_m)_{[r]}$ Tiempo de inactividad del trabajo en la posición r del agendamiento en la máquina m . [Horas]
 $\psi_{[j]}$ Tiempo mínimo de inactividad del trabajo en la posición j de la máquina m , tal que (9) [Horas]

$$\psi_{[j]} = \begin{cases} \min_{q=j+1, \dots, |\sigma_m|} \{\phi(S_m)_{[q]}\} & ; Si j < |\sigma_m|. \\ BIGM & ; Si j = |\sigma_m|. \end{cases} \quad (9)$$

Condiciones propuestas por Ho y Chang

$$\begin{aligned} d_{[i]} &\geq b_{[j]} + p_{[i]} && \forall m \in J, i \in \{0, \dots, |\pi|\}, j \in \{0, \dots, |\sigma_m|\} \mid (m < M - 1) \wedge \pi \neq \emptyset \quad (10) \\ \psi_{[j]} &\geq p_{[i]} - p_{[j]} && \forall m \in J, i \in \{0, \dots, |\pi|\}, j \in \{0, \dots, |\sigma_m|\} \mid (m < M - 1) \wedge \pi \neq \emptyset \quad (11) \\ \phi(S'_m)_{[j]} &> d_{[i]} - b_{[j]} - p_{[i]} && \forall m \in J, i \in \{0, \dots, |\pi|\}, j \in \{0, \dots, |\sigma_m|\} \mid (m < M - 1) \wedge \pi \neq \emptyset \quad (12) \\ \left[(d_{[i]} > d_{[j]}), (p_{[i]} > p_{[j]}), \left((p_{[i]} - p_{[j]}) (|\sigma_m| - j + 1) > (d_{[i]} - d_{[j]}) \right) \right] &&& \forall m \in J, i \in \{0, \dots, |\pi|\}, j \in \{0, \dots, |\sigma_m|\} \mid (m < M - 1) \wedge \pi \neq \emptyset \quad (13) \end{aligned}$$

Dado que el número de trabajos a tiempo antes y después del intercambio no puede variar, pues el algoritmo de Moore proporciona optimalidad frente a una máquina, el autor propone la adopción de las condiciones (10) y (11). La desigualdad (10) garantiza que el trabajo $i \in \pi$ no se retrase cuando sea intercambiado con el trabajo j de la máquina m y (11) asegura que el intercambio no genere nuevos atrasos en los trabajos después de j en la máquina m , ya que el tiempo remanente que provoque el nuevo trabajo debe poder cubrirse por el de mínima inactividad. Por otro lado, la última condición expresada mediante (12) y (13) es propuesta al analizar diferentes casos disponibles en [Anexo 19]. Sea $|\sigma_m|$ y $|\pi|$ la cardinalidad de cada conjunto. Para tener una mayor comprensión de la heurística, en el ALGORITMO II se presenta el pseudocódigo de esta y su implementación en [34].

ALGORITMO II. PSEUDOCÓDIGO DE LA HEURISTICA H2

Entradas: Colección de trabajos $A[0 \dots N]$, $N \geq 0$ tal que $A[n]$ contiene la lista $[Job_n, p_n, d_n]$ indicando el nombre Job_n , tiempo de procesamiento p_n y plazo máximo de entrega d_n del trabajo n , tal que $0 \leq n < N$; Número de máquinas M a utilizar.

Procedimiento:

Para cada trabajo de la colección $A[0 \dots N]$,

Si el tiempo de procesamiento es mayor a su plazo de entrega, tal que $p_n > d_n$.

Se ubica el trabajo en la lista de imposibles.

De lo contrario,

Se añade a la lista π de no agendados.

Para cada máquina $m \in J$,

Agendar los trabajos de la lista π en la secuencia σ_m de la máquina m .

Ordenar los trabajos de acuerdo con la regla EDD (plazo de entrega más temprano) y SPT (Tiempo de procesamiento más corto), y reconocer dicha secuencia como la actual, tal que $d_0 \leq \dots \leq d_n \dots \leq d_N$, $Job_0 \leq \dots \leq Job_n \dots \leq Job_N$.

Si en la secuencia actual se encuentra un trabajo Job_q que viola su plazo de entrega,

Revisar la secuencia desde la posición inicial hasta el incumplimiento de la restricción $Job_0 \dots Job_q$, encontrar el trabajo con un tiempo de procesamiento mayor Job_{max} dentro de esta subsecuencia, removerlo de la secuencia actual y añadirlo a la lista de no agendados π .

(Continuar realizando esta acción hasta que no existan más trabajos que sobrepasen su plazo de entrega).

Si la lista de no agendados no se encuentra vacía $\pi \neq \emptyset$ y las $M - 1$ máquinas aún no han sido revisadas.

Calcular el tiempo de inicio b_j y tiempo mínimo de inactividad ψ_j de cada trabajo en la posición j de la secuencia σ_m .

Para cada trabajo $j \in \sigma_m$,

Para cada trabajo $i \in \pi$,

Calcular el tiempo de inactividad $\phi(S_m)_j$ de cada trabajo en la posición j de la secuencia σ_m .

Si la condición (10) y (11) y la ((12) o (13)) son cumplidas,

Intercambiar el trabajo $j \in \sigma_m$ del agendamiento de la máquina m por el trabajo $i \in \pi$ de la lista de no agendados.

Calcular el nuevo tiempo de inicio b_j y mínimo de inactividad ψ_j de cada trabajo en la posición j de la secuencia σ_m tras el intercambio.

Salidas: Secuencia de la máxima cantidad de trabajos de $A[0 \dots N]$ a ser procesados en la máquina $m \in J$ que no violan el plazo límite de entrega.

Al garantizar un correcto agendamiento de un conjunto de trabajos en m máquinas paralelas, por último, se implementó una restricción de disponibilidad a partir del modelo propuesto por Almasarwah *et. al* [12]. En esta se considera que el intervalo de mantenimiento h (periodo de no disponibilidad del CAP) es agendado luego del intervalo de trabajo WT y la magnitud de ambos es conocida anticipadamente, al igual que los tiempos de procesamiento p_n y plazos de entrega d_n . Para este modelo se asume que el trabajo a realizar tiene una duración menor a las horas totales en un intervalo de trabajo, por lo cual si este puede ser completado durante el intervalo se agenda, de lo contrario se asigna al próximo intervalo o se denota como trabajo tardío. A continuación, se presenta la adaptación del modelo, para ver su implementación diríjase a [34].

Conjuntos

- I Conjunto de trabajos a realizar. $n, r, k, z \in I = \{0, \dots, N - 1\}$
 J Conjunto de máquinas disponibles. $m \in J = \{0, \dots, M - 1\}$

Parámetros

- d_n Plazo de entrega del trabajo n . [Horas]
 p_n Tiempo de procesamiento del trabajo n . [Horas]
 WT Disponibilidad del establecimiento para ejecutar actividades. [Horas]
 HT Horas totales en un día. [Horas]
 CT_k Tiempo de finalización del intervalo de trabajo k . [Horas]
 $BIGM$ Número considerablemente grande.

VARIABLES DE DECISIÓN

- X_{nmk} $\begin{cases} 1 \text{ si el trabajo } n \text{ esta a tiempo en la máquina } m \text{ el día } k. \\ 0 \text{ de lo contrario.} \end{cases}$
 Y_{nmk} $\begin{cases} 1 \text{ si el trabajo } n \text{ se agenda de último en la máquina } m \text{ el día } k. \\ 0 \text{ de lo contrario.} \end{cases}$
 MAX_{nmk} $\begin{cases} 1 \text{ si un trabajo } n \text{ se agenda en la máquina } m \text{ el día } k. \\ 0 \text{ de lo contrario.} \end{cases}$

Función objetivo

$$\text{Maximizar} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (X_{nmk} + Y_{nmk}) \quad (14)$$

Restricciones

$$\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} (X_{nmk} + Y_{nmk}) \leq 1 \quad \forall n \in I \quad (15)$$

$$(CT_{k-1} * MAX_{nmk}) + \sum_{z=0}^r (p_z * (X_{zmk} + Y_{zmk})) \leq d_r \quad \forall r \in I, k \in \{0, \dots, r\}, m \in J \quad (16)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} (p_n * X_{nmk}) \leq WT \quad \forall k \in I, m \in J \quad (17)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} (p_n * (X_{nmk} + Y_{nmk})) \leq HT \quad \forall k \in I, m \in J \quad (18)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} (Y_{nmk}) \leq 1 \quad \forall k \in I, m \in J \quad (19)$$

$$BIGM * (1 - Y_{nmk}) \geq \sum_{z=n}^{N-1} (X_{zmk}) \quad \forall n \in I, m \in J, k \in I \quad (20)$$

$$X_{rmk} + Y_{rmk} \leq MAX_{nmk} \quad \forall n \in I, k \in \{0, \dots, n\}, r \in \{0, \dots, n\}, m \in J \quad (21)$$

$$X_{nmk}, Y_{nmk}, MAX_{nmk} \in \{0,1\} \quad \forall n \in I, m \in J, k \in I \quad (22)$$

En el modelo es posible apreciar la inclusión de un nuevo índice k , el cual hace referencia al intervalo (jornada) de trabajo. Este es indexado por N , dado que en el peor de los casos (al tener en cuenta que cada trabajo posee un tiempo de procesamiento menor a $HT=24$ horas) el número de *batches* (días requeridos) será igual al número de trabajos. De esta forma, la expresión (14) indica el objetivo de optimización, y las restricciones en (15) limitan que cada trabajo sea asignado dentro de una máquina y un único intervalo de trabajo. El conjunto de restricciones (16) aseguran que los trabajos sean entregados de acuerdo con su plazo de entrega, tal que si algún trabajo n ha sido asignado a la máquina m en el día k , el nuevo trabajo se verá afectado por el tiempo de finalización del intervalo de trabajo anterior (teniendo en cuenta que $CT_{-1} = 0$). Las restricciones (17) restringen a los trabajos asignados dentro del intervalo de atención a no sobrepasar dicha magnitud (en este caso $WT = 11$ horas). El conjunto de restricciones (18) limitan el modelo a agendar los trabajos dentro del día en que son programados a pesar de que sobrepasen la jornada de trabajo, tal que un trabajo no podrá empezar en un día y terminar el otro pues no se considera el escenario *resumable* de disponibilidad. Las restricciones en (19) aseguran que únicamente pueda ser desarrollado un trabajo por fuera de la jornada en cada máquina. El conjunto de restricciones (20) permiten restringir el agendamiento de trabajos luego de que la variable Y_{nmk} se active, pues de hacerlo representará el último trabajo a ser realizado en un día y no habrá algún operario que pueda montar o desmontar los objetos hasta el día siguiente. Las restricciones en (21) otorgan valor a MAX_{nmk} con relación a los $n + 1$ trabajos evaluados, tal que esta variable tomará valor de 1 si algún trabajo dentro de este rango se asigna a la máquina m el día k . Por último, las restricciones (22) otorgan la condición binaria a las variables de decisión.

- Verificación del diseño

Esta metodología cumple con sus respectivas restricciones pues al no consumir más de siete minutos por intervalo de atención podrá adaptarse sin problema al horario de la monitora. Además, al permitirle al Centro de Automatización conocer los espacios de atención de cada actividad, le dará la oportunidad de establecer jornadas de trabajo confiables que deba seguir la monitora, lo que no requerirá de cambios a su contrato y le llevará a satisfacer a sus clientes. El [Anexo 20] presenta el diagrama de flujo que contempla el diseño creado para cumplir con este fin y el [Anexo 21] un método para recolectar información respectiva al proceso y mantener un histórico de datos.

Aunque el caso descrito a continuación no se presenta en la validación del diseño por el carácter de los ejemplos, en algunas instancias del problema será posible encontrar que la entrega de un pedido deba ser sacrificada por el desarrollo de otros que propicien la atención de la mayor cantidad de trabajos antes de su plazo. No obstante, esto le permitirá al CAP dar a conocer al estudiante o profesor espacios tentativos para los cuales podría tener completada su orden, tal que desde un principio los usuarios conozcan cuando serán desarrollados sus pedidos y puedan hacer ajustes pertinentes a sus cronogramas o solicitarle al profesor una ventana de tiempo un poco más extensa para la entrega de sus proyectos de impresión.

B. Validación del diseño propuesto

Dado que el contexto de la pandemia significó que el desarrollo de pedidos se redujera de manera sustancial, para la validación del diseño se corrieron treinta simulaciones para el nivel máximo de demanda atendida por el CAP, las cuales fueron desarrolladas mediante un algoritmo en Python [34] para asegurar que estas contaran con un tiempo de procesamiento en horas modelado por una Distribución Gamma con los siguientes parámetros $X \sim T(\alpha = 1,449, \lambda = 0,45)$ y un plazo de entrega en días con una Distribución Uniforme empírica discreta con parámetros $X \sim U(x_1 = 1, x_2 = 2, x_3 = 3, x_4 = 4, x_5 = 7, x_6 = 8, x_7 = 9, x_8 = 10, x_9 = 11)$, haciendo referencia a los días de la semanas de parciales (excluyendo sábados y domingos), tal que 1: Martes primera semana y 11:Viernes segunda semana. Asimismo, para mantener una concordancia con las unidades del tiempo de procesamiento, el número aleatorio generado se convirtió a horas, asumiendo que los trabajos tendrían que ser entregados faltando dos horas para que se acabe la jornada de trabajo de cada día pues se espera medir el rendimiento de la metodología con respecto a un panorama real. Las instancias evaluadas pueden encontrarse en el [Anexo 25].

Para garantizar que el diseño cumpliera con sus requerimientos, se recopilaron los resultados de las simulaciones en el [Anexo 24] y se desempeñaron múltiples pruebas de hipótesis mediante Minitab para validar que la meta hubiera sido alcanzada. De esta forma, con un nivel de confianza del 95%, fue posible encontrar que el modelo permite disminuir el tiempo de finalización de 23 a 10 días aproximadamente y el objetivo del proyecto es cumplido a cabalidad, tal que en la totalidad de las simulaciones no se presentan trabajos tardíos y se refleja una variación porcentual positiva del 188,24% con respecto al estado actual.

VI. CONTROLAR

A. Medición de los impactos

La reducción de la cantidad de pedidos entregados luego de su plazo tiene grandes repercusiones en el nivel de fiabilidad percibido por el usuario al generar mayor competitividad y permitir captar más clientes. Por lo cual, el diseño de la metodología no solo permite mejorar el agendamiento de las actividades en las instalaciones del Centro de Automatización de Procesos, sino en múltiples sistemas incluyendo el esquema de la manufactura aditiva. Por esta razón, se realizaron nuevas simulaciones para probar el impacto social de la propuesta en volúmenes de trabajos mayores y diferentes números de máquinas.

$$TCR = \frac{\bar{p}n}{\bar{d}m} \quad (23)$$

Para esto fue tenido en cuenta el planteamiento de Ho y Chang [32], en la generación de variables aleatorias, de forma que los tiempos de procesamiento y plazos de entrega fueron simulados como una distribución uniforme $X \sim U(1,20)$ y $X \sim U(1,2n\bar{p}/(m * q))$, respectivamente. Tal que, n corresponde a la cantidad de trabajos solicitados, \bar{p} al promedio de sus tiempos de procesamiento, m a la cantidad de máquinas y q a la tasa de congestión cuyo valor es determinado a partir de ocho niveles de tráfico (TCR) 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 y 5.0. Vale recalcar que la TCR proviene de la expresión (23) donde el numerador hace referencia a la congestión (tiempo de procesamiento promedio de todos los trabajos) y el denominador a la velocidad de digestión de las máquinas para cumplir con los plazos de entrega promedio (\bar{d}). Lo cual permite que exista un equilibrio entre las reglas de prioridad Plazo de Entrega más temprano (EDD) y Tiempo de Procesamiento Más Corto (SPT). De forma que el EDD tenga un peso menor en un taller muy congestionado y mayor en un taller poco congestionado, y el SPT tenga un peso mayor en un taller congestionado y menor en un taller poco congestionado [32]. Los experimentos realizados fueron llevados a cabo en un computador con procesador Intel® Core™ i5-9600K CPU @4.0GHz y memoria RAM de 16.00 Gb @2777 MHz.

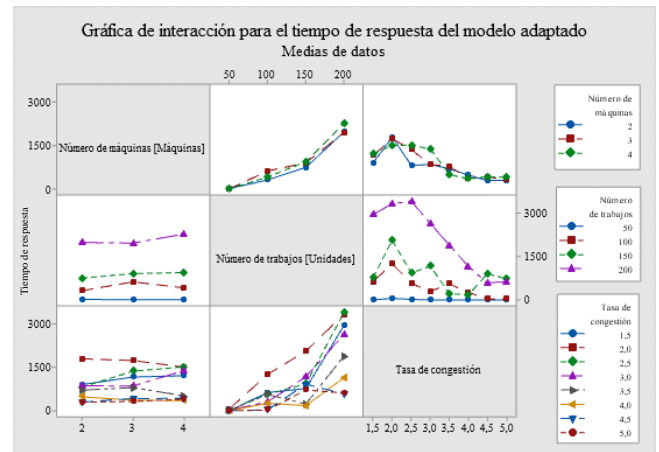
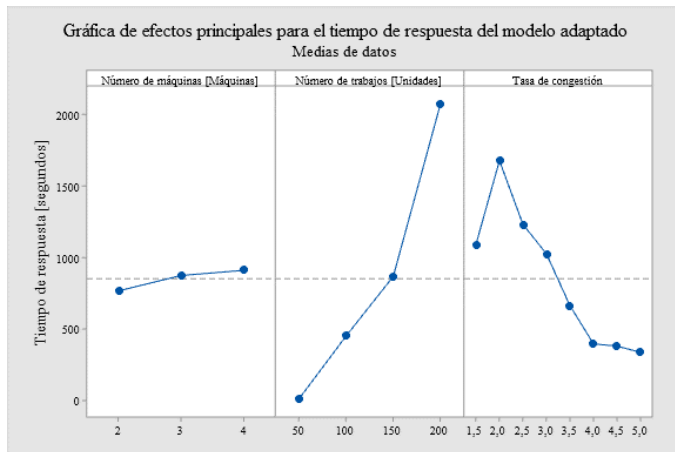


Fig. 11. Gráfica de efectos principales para el tiempo computacional del modelo adaptado.

Fig. 12. Gráfica de interacción para el tiempo computacional del modelo adaptado.

Al evaluar la adaptación del modelo propuesto por Almasarwah *et. al* [12], la Fig. 11 expone el crecimiento del tiempo computacional del diseño al aumentar el número de máquinas y trabajos, y disminuir la tasa de congestión en el sistema, atribuyendo este último efecto al número de posibles soluciones iguales que se presentan cuando los plazos de entregan son flexibles y realizando el paralelo con el escenario donde al aumentar la tasa de congestión las soluciones parciales sean recortadas al no cumplir con sus plazos de entrega. Con respecto a la Fig. 12, es posible encontrar que independiente del valor que tome la tasa de congestión y el número de máquinas, el tiempo computacional tiende a aumentar a medida que el número de trabajos lo hace, siendo la variable independiente que posee una mayor incidencia en el tiempo de respuesta. Además, al examinar el número de trabajos a tiempo, en la Fig. 13, es posible notar cómo estos disminuyen a medida que las tasas de congestión aumentan, lo cual es congruente con la generación de variables aleatorias. A medida que el tráfico aumenta en el sistema es más complicado cumplir con la demanda en el plazo pactado por la cantidad ordenes que deben ser entregadas con prisa. Teniendo en cuenta que una de las variables para la generación de los plazos de entrega es el número de máquinas a utilizar se encuentra que no se presentan variaciones frente a los trabajos a tiempo puesto que la instancia probada es generada con esta intención. Por último, de acuerdo con el [Anexo 26], es posible observar que el modelo propuesto con un tiempo límite de respuesta de una hora alcanza el óptimo el 82,71% de las veces y la brecha frente al valor óptimo es en promedio 1,19%.

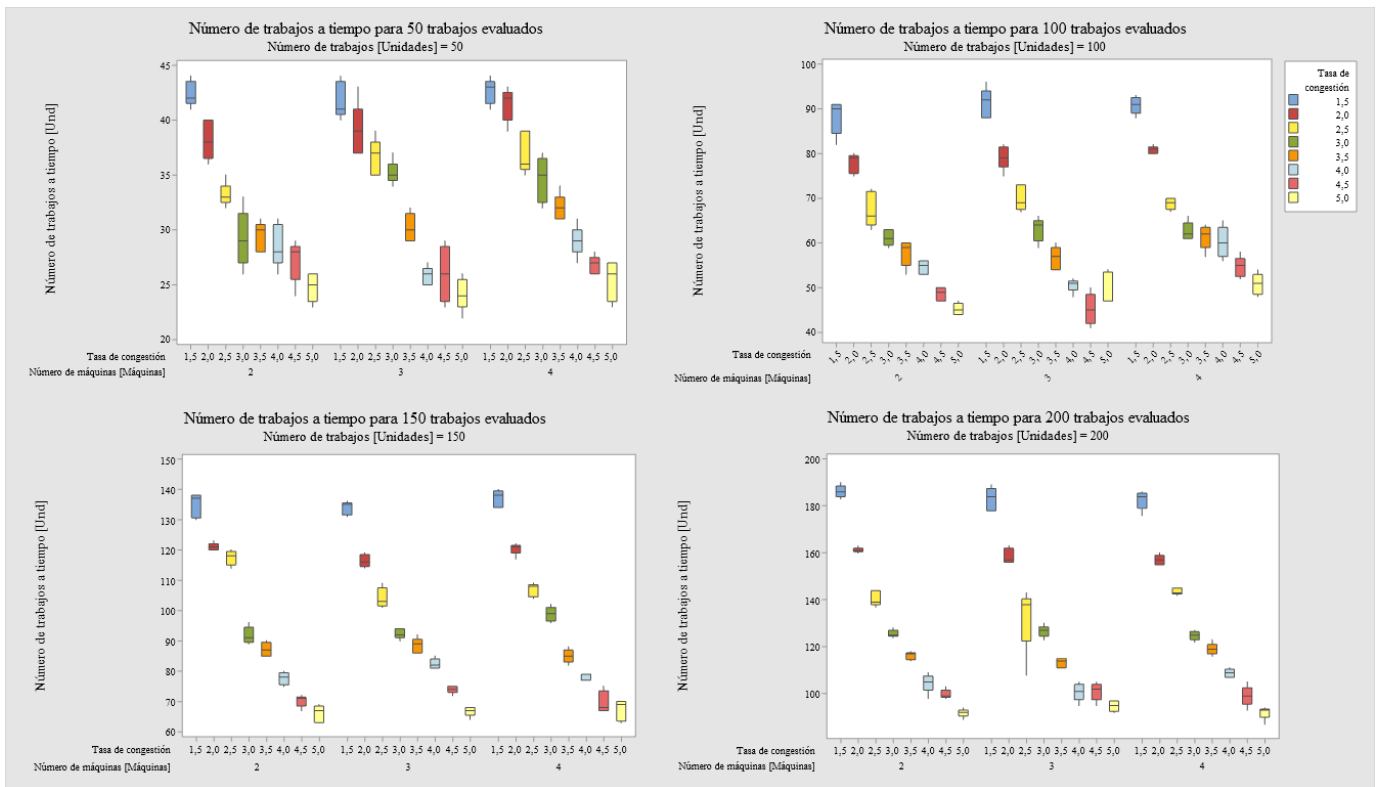


Fig. 13. Gráfico de intervalos del número de trabajos a tiempo.

Dado que el Centro de Automatización de Procesos posee una demanda relativamente baja en comparación a sistemas de producción robustos donde el desarrollo de una heurística presenta soluciones frente al alto tiempo computacional que tarda un modelo de programación lineal en arrojar una respuesta, la implementación del algoritmo de Ho y Chang [7] fue pausada para responder al problema planteado, dada la rapidez de respuesta del modelo propuesto por Almasarwah *et. al* [12] en un bajo número de trabajos. Sin embargo, la implementación realizada no es depreciable, ya que ofrece tiempos de respuesta más bajos a instalaciones con un mayor volumen de pedidos y jornadas de completa disponibilidad. Por esto, se realizaron nuevas simulaciones con el mismo método de generación de variables mostrado anteriormente y se comparó el tiempo de respuesta otorgado por el modelo de Süer *et. al* [6] y la heurística frente a diferentes volúmenes de trabajos, números de máquinas y tasas de congestión.

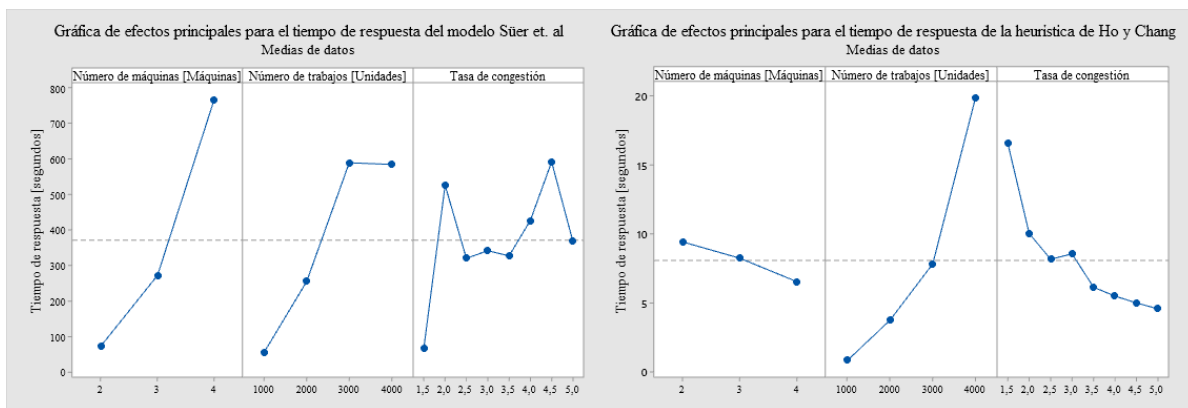


Fig. 14. Gráfica de efectos principales para el tiempo computacional del modelo de Süer *et. al* [6] y la heurística de Ho y Chang [7].

Al examinar la incidencia de los efectos principales en el tiempo computacional, la Fig. 14 muestra una tendencia similar de crecimiento de la variable de respuesta a medida que el número de trabajos aumenta en ambas implementaciones. No obstante, el número de máquinas y la tasa de congestión muestran una tendencia contraria en ambos modelos para determinar el tiempo de respuesta. Al comparar el modelo de Almasarwah *et. al* [12] con las implementaciones realizadas, se encuentra una tendencia

similar en la variable número de máquinas con el modelo Süer *et. al* [6] y en la tasa de congestión con la heurística de Ho y Chang [7]. Analizar los escenarios descritos anteriormente es importante dado que, al observar la Fig. 15, el efecto que proporciona una mayor incidencia en el tiempo computacional pasa de ser el número de trabajos al número de máquinas en el modelo de Süer *et. al* [6]. Por esto el tiempo de respuesta se ve afectado a medida que estas aumenten, independientemente de que se presenten diferentes tasas de congestión o números de trabajos. Este ocurre de manera contraria en la heurística propuesta por Ho y Chang [7] donde el número de trabajos permanece como la variable de mayor incidencia en el tiempo de respuesta independiente del número de máquinas y la tasa de congestión, como se muestra en la adaptación del modelo de Almasarwah *et. al.* [12].

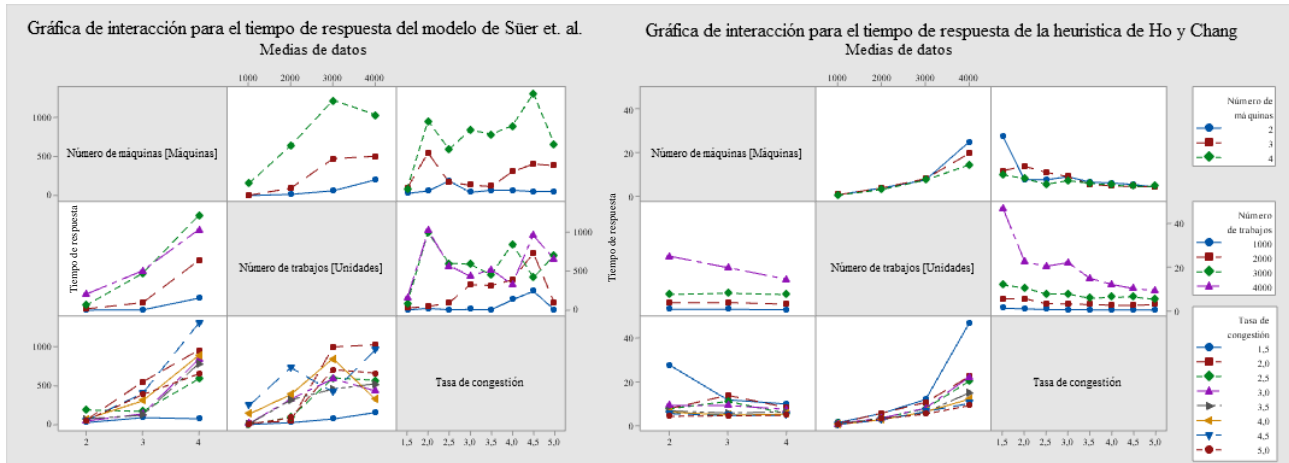


Fig. 15. Gráfica de interacción para el tiempo computacional del modelo de Süer *et. al.* [6] y la heurística de Ho y Chang [7].

Al analizar las simulaciones [Anexo 27] se encuentra que el modelo proporciona una brecha del 0,05% y alcanza el valor óptimo el 95,63% de las veces al considerar un tiempo límite de respuesta de una hora, mientras que la heurística otorga una brecha del 0,14% y llega al óptimo el 19,17% de las veces. No obstante, la Fig. 16 muestra que, para cada factor evaluado en el modelo, el tiempo de respuesta disminuye drásticamente al hacer uso de la heurística y no se identifica una alta variación con respecto al valor óptimo.

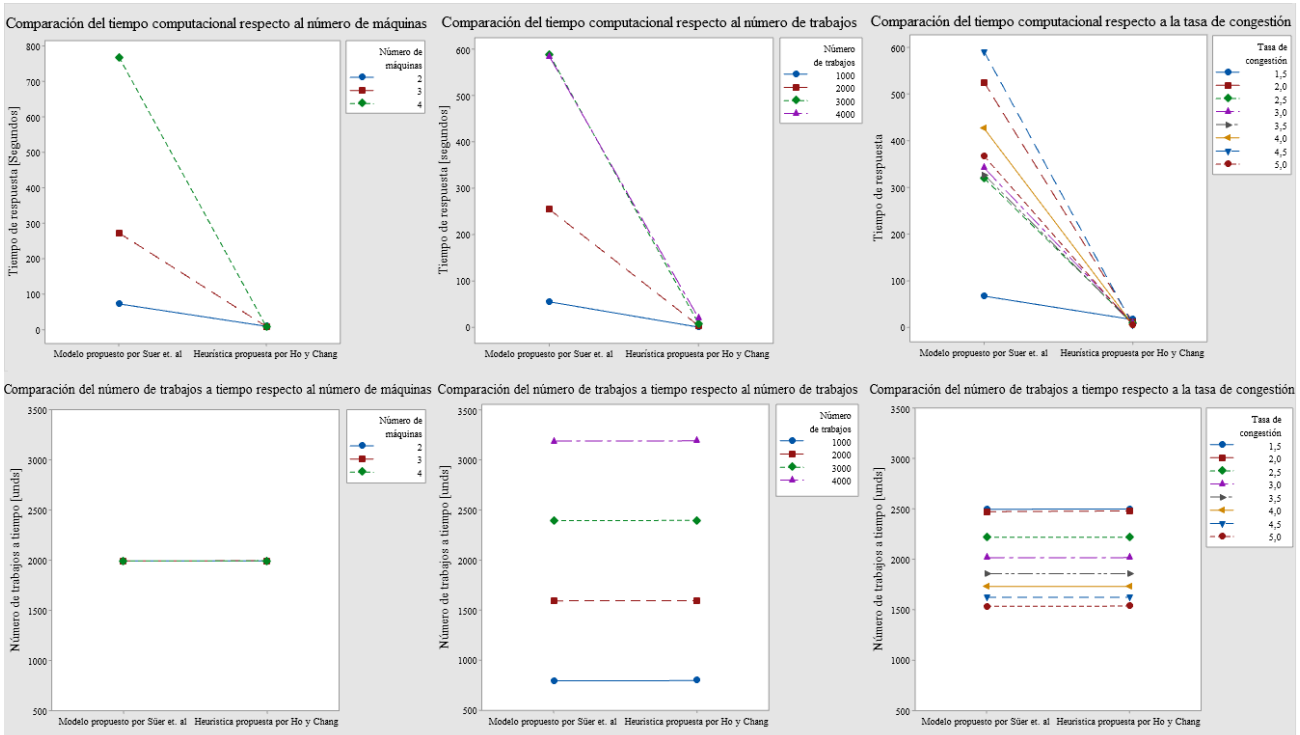


Fig. 16. Gráfica de líneas para comparación del tiempo computacional del modelo de Süer [6] *et al.* y la heurística de Ho y Chang [7].

A pesar de que las máquinas deben estar conectadas constantemente, el secuenciar los trabajos atendiendo a las restricciones de disponibilidad de las instalaciones promueve el aprovechamiento y uso inteligente de la energía gastada. Además, proponer trazabilidad en el proceso permite la recopilación de información valiosa tanto para que el operario pueda verificar el proceso, como para promover nuevos proyectos en los que el material de un trabajo realizado de manera errónea o desechado por los estudiantes una vez sea presentado, pueda ser reutilizado. Por esto, en cuanto a la primera iniciativa, el proceso puede ser controlado mediante el gráfico de torta encontrado en el [Anexo 21] de la sección de trazabilidad, tal que a medida que el operario encuentre que la proporción de trabajos con inconvenientes aumenta pueda tomar acciones correctivas, de forma que el material no sea desaprovechado en pedidos erróneos y en caso de que lo sea, su causa sea detectada mediante la misma encuesta. Por parte de la segunda iniciativa el mantener un inventario de material proveniente a proyectos de clase o pedidos fallidos permite motivar el desarrollo de nuevos proyectos para generar filamento con el que las máquinas sean alimentadas, lo cual no solo ahorraría dinero, sino que disminuiría la cantidad de termoplásticos liberados al ambiente.

B. Estandarización de la solución – POE'S (plan de control)

Con la finalidad de corregir el problema encontrado en el agendamiento de pedidos, evitar su reincidencia, regir una secuencia de acciones específicas a desempeñar y estandarizar el proceso de impresión de artículos 3D se creó un manual de instalación y usuario para el personal del Centro de Automatización de Procesos, los cuales pueden ser observados mediante el [Anexo 23] y [Anexo 22], respectivamente.

C. Conclusiones

Con base en los objetivos planteados, definir las restricciones del problema permitió plantear principios claros para el desarrollo del proyecto y realizar la búsqueda de artículos relacionados. Para alcanzar el objetivo de disminuir la cantidad de pedidos atrasados fue de gran importancia comprender el algoritmo de Moore y Hodgson [5] con el fin de garantizar optimalidad en el agendamiento de una máquina en $O(N \log N)$, la heurística desempeñada por Ho y Chang [7] en $O(MN^5)$ así como el modelo desarrollado por Süer, Báez y Z. Czajkiewicz [6] para extender el problema a un conjunto de máquinas paralelas idénticas y el modelo planteado por Almasarwah, Chen, Süer y Yuan [12] para asignar restricciones de disponibilidad al agendamiento. Al considerar el tamaño de los modelos, vale recalcar que el primero posee NM variables de decisión, $N(1 + M)$ restricciones y 2^{NM} soluciones posibles, mientras el segundo dispone de $2N^2M$ variables de decisión, $N + (3N^2M + 5NM)/2$ restricciones y 2^{2N^2M} posibles soluciones.

En cuanto al desarrollo de la metodología de diseño, se resalta la adopción de periodos de no disponibilidad en los que el último trabajo realizado durante el día tiene la posibilidad de permanecer ejecutándose tras acabar la jornada, dada la característica de la maquinaria para apagarse al terminar de ejecutar una solicitud y detectar inactividad, permitiendo aprovechar la productividad de los equipos durante las noches y garantizar la entrega de la mayor cantidad de solicitudes durante su plazo. Esto otorga $3N^2M$ variables de decisión, $N + (5N^2M + 9NM)/2$ restricciones y 2^{3N^2M} posibles soluciones al problema.

Por último, al validar el impacto de la propuesta mediante las corridas de simulación fue posible notar que el modelo adaptado permite que el CAP pase de entregar un 20,41% de solicitudes al total de la demanda a tiempo y su tiempo de finalización de actividades se reduzca por encima de la mitad. Además, al ampliar el estudio para ofrecer respuesta a sistemas productivos robustos, se encontró que al atender un volumen de demanda entre los 150 a 200 trabajos bajo una tasa de 1,5 e igual o superior a 2,5 el modelo puede responder en un tiempo computacional apropiado. No obstante, en problemas iguales o por encima de los 200 trabajos este puede tardar más de una hora en obtener un resultado o detener su ejecución debido a falta de memoria, lo que se puede atribuir al alto número de posibles soluciones exploradas. Por otro lado, al evaluar el desempeño de la heurística de Ho y Chang contra el modelo de Süer et. al. en escenarios de disponibilidad completa se encontró que este primero provee optimalidad en el 19,17% de los casos evaluados. Sin embargo, su brecha con el valor óptimo al acercarse al 0,14% promueve un escenario favorable para presentar buenas respuestas en un tiempo computacional drásticamente inferior.

Al cumplir con los objetivos y el plan de trabajo se afirma que el problema de ingeniería es resuelto en gran medida tras el desarrollo de la metodología, por lo que al agendar las actividades mediante el diseño es posible cumplir con la demanda de los usuarios y garantizar su satisfacción en cuanto a la entrega oportuna. Sin embargo, es pertinente recalcar que garantizar la entrega de la mayor cantidad de demanda puede significar sacrificar el desarrollo de cierta cantidad de pedidos. Por tanto, pueden existir casos donde no todos los trabajos sean entregados a tiempo.

D. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos por las simulaciones es posible encontrar que el problema es mejorado. Es pertinente realizar ciertas acotaciones para proponer trabajo futuro y mejorar otros aspectos del CAP que no fueron tenidos en cuenta dentro de la metodología.

- En cuanto al trabajo futuro, se propone implementar restricciones de simetría al modelo para permitir que este pueda otorgar un tiempo computacional inferior. Además, se aconseja implementar en la fase uno de la heurística propuesta por Almasarwah *et al.* [12], el algoritmo de Ho y Chang (H2) desempeñado mediante el documento, dado que como pudo notarse anteriormente ofrece buenos resultados en corto tiempo y sería interesante conocer su desempeño considerando intervalos de no disponibilidad. Por otro lado, se recomienda ampliar la investigación incluyendo dentro de la programación *Release Dates* y *Nesting o Batch Scheduling*, tomando en consideración que en ocasiones los problemas relacionados con la manufactura aditiva se encuentran enfocados en impresión 3D laser, por lo cual la cama de impresión posee dimensiones que pueden ser aprovechadas para la realización de pedidos y el contemplar *Release Dates* es beneficioso para proveer prioridad a los pedidos que hayan sido ordenados primero. Dentro del estudio no se contemplaron estos enfoques ya que las dimensiones del espacio de impresión de las máquinas son relativamente pequeñas y no se posee información histórica de los tiempos de liberación de pedidos.
- En cuanto al CAP, se propone desempeñar un sistema de mantenimiento preventivo para evitar que se produzcan atascos en el sistema, las máquinas puedan ser aprovechadas y los pedidos puedan ser entregados sin problemas a los usuarios. Además, se recomienda no adquirir por el momento nuevas máquinas a menos de que el crecimiento de la demanda lo amerite dado que las que se encuentran en las instalaciones pueden cumplir con esta sin problemas.

VII. GLOSARIO

PLA: Es un poliéster biodegradable compuesto por componentes básicos de ácido láctico, y uno de los plásticos más utilizados en la impresión 3D para otorgar estética a los prototipos [14].

ABS: Material indicado en la impresión 3D cuando el prototipo a realizar debe estar condicionado a cargas pesadas o quedar expuesto a temperaturas extremas [15].

Programa Cura: Software en el que son modificados parámetros de impresión y los archivos son transformados de formato STL a código G [16].

Código G: Es un fichero que contiene programación como un listado de instrucciones sencillas que la impresora sigue para realizar la impresión correctamente [17].

Archivo STL: Es un formato de diseño asistido por computadora (CAD) que define la geometría de los objetos 3D [18].

Diseño asistido por computadora (CAD): Es el uso de ordenadores para complementar la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño [19].

Makespan: Diferencia entre el tiempo de inicio y finalización de una secuencia de trabajos o tareas [20].

NP- Complete: Es un problema *NP* que puede ser reducible en tiempo polinomial a otro problema *NP* [21].

NP-Hard: Es un problema que es al menos tan difícil como un problema *NP-Complete* y no puede ser atendido en tiempo polinomial, además todos los problemas *NP-Complete* pueden ser reducidos a este problema en tiempo polinomial. No necesariamente, estos pertenecen a problemas *NP* [21].

Bin Packing problem: Es un problema de optimización combinatoria *NP-Complete* en el cual, dado un conjunto de ítems de tamaño variable, se busca acomodar la mayor cantidad de estos dentro de contenedores de tamaño fijo, con el fin de optimizar el número de contenedores a utilizar, es decir, usar el menor número de contenedores para colocar el mayor número de ítems posible [22].

Two partition problem: Busca determinar si un conjunto dado puede ser dividido en dos subconjuntos de modo que la suma de elementos en ambos subconjuntos sea repartida [23].

Knapsack problem: Es un problema *NP-Complete* de optimización combinatoria. Para mejorar su entendimiento, supóngase una mochila donde se posee una capacidad máxima y se deben ubicar la mayor cantidad de objetos sin que estos sobrepasen dicha capacidad [24].

Fabricación avanzada: Es un conjunto de tecnologías para realizar la fabricación de una manera más ágil y eficiente [25].

Agendamiento de actividades: Busca asignar la máxima cantidad de actividades a un horario sin que sean superpuestas [26].

Correlación múltiple: En estadística, la correlación múltiple es la relación asociativa en la que intervienen más de dos variables. Esta es realizada con el fin de definir qué tan bien se puede predecir una variable a partir de otras [27].

Matriz AHP: Método de decisión multicriterio que ayuda a seleccionar una alternativa frente a una serie de criterios que suelen entrar en conflicto [28].

Metodología Lean: “Filosofía de mejoramiento, basada en el trabajo en equipo y el aprovechamiento del talento humano, que busca reducir continuamente el tiempo entre la llegada de la orden de un cliente y su entrega, al menor costo y la más alta calidad, mediante la eliminación de desperdicios (actividades que no agregan valor), la reducción de la variabilidad de los procesos, y la construcción de un flujo flexible halado por el cliente” [29].

TPM: Es una metodología Lean Manufacturing de mejora que permite asegurar la disponibilidad y confiabilidad prevista de las operaciones, de los equipos, y del sistema, mediante la aplicación de los conceptos de: prevención, cero defectos, cero accidentes, y participación total de las personas [30].

Manufactura aditiva por deposición fundida: Método de impresión en el que una pieza es desarrollada a partir de filamento fundido, el cual es depositado en la cama de impresión por una cabeza de extrusión [31].

VIII. REFERENCIAS

- [1] L. Gómez Reyes, "Análisis Documental De Los Inconvenientes De La Impresión 3D", *3C Tecnología*, vol. 6, n.º 3, p. 53, 2017. [Online]. Available: 3ciencias.com/wp-content/uploads/2017/09/ART-4.pdf [Accessed: 13- Jun- 2021]
- [2] El Heraldo, "Revolución 3D también se imprime en Colombia", 2015. [Online]. Available: <https://www.elheraldo.co/tendencias/en-marcha-soluciones-3d-para-la-ciencia-e-industria-colombiana-227418> [Accessed: 13- Jun- 2021]
- [3] Masuch, Thomas. "Consumer Products & Electronics Increasingly Important for Am Market", 2020. [Online]. Available: <https://fon-mag.de/industry-news/2020/05-wohlers-report/?L=1> [Accessed: 13- Jun- 2021]
- [4] E. Rúa, F. Jiménez, G. Gutiérrez, N. Villamizar, "Impresión 3D como Herramienta Didáctica para la Enseñanza de Algunos Conceptos de Ingeniería y Diseño", 2018, vol.23, n.1, p.70-38. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2018000100070&lang=es [Accessed: 13- Jun- 2021]
- [5] J. Moore, "An n Job, One Machine Sequencing Algorithm for Minimizing the Number of Late Jobs", *Management Science*, vol. 15, no. 1, pp. 102-109, 1968.
- [6] G. Süer, E. Báez and Z. Czajkiewicz, "Minimizing the number of tardy jobs in identical machine scheduling", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 25, no. 1-4, pp. 243-246, 1993.
- [7] J. Ho and Y. Chang, "Minimizing the number of tardy jobs for m parallel machines", *European Journal of Operational Research*, vol. 84, no. 2, pp. 343-355, 1995.
- [8] R. M'Hallah and R. Bulfin, "Minimizing the weighted number of tardy jobs on parallel processors", *European Journal of Operational Research*, vol. 160, no. 2, pp. 471-484, 2005.
- [9] B. Lin and A. Jeng, "Parallel-machine batch scheduling to minimize the maximum lateness and the number of tardy jobs", *International Journal of Production Economics*, vol. 91, no. 2, pp. 121-134, 2004.
- [10] J.-N. Freens, I.-F Adan, A. Y. Pogromsky, and H. Ploegmakers, "Automating the production planning of a 3D printing factory," in *Proceedings of 2015 Winter Simulation Conference*, Gothenburg, 2015, pp. 2136-2147.
- [11] M. Adamu and A. Adewumi, "Minimizing the weighted number of tardy jobs on multiple machines: A review", *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 12, no. 4, pp. 1465-1493, 2016.
- [12] N. Almasarwah, Y. Chen, G. Süer and T. Yuan, "Minimizing the Number of Tardy Jobs on Identical Parallel Machines Subject to Periodic Maintenance", *Procedia Manufacturing*, vol. 38, pp. 1409-1416, 2019.
- [13] L. Sturm, "A Simple Optimality Proof of Moore's Sequencing Algorithm", *Management Science*, vol. 17, no. 1, pp. 116-118, 1970.
- [14] 3D Natives, "¿Qué tan ecológico es realmente el filamento PLA?", 2019. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/>. [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [15] 3D Natives, "El filamento de ABS en la impresión 3D", 2019. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/> [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [16] 3D Natives, "Las características de Cura, el laminador más extendido en el mercado de la impresión 3D", 2020. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/cura-laminador-para-impresion-3d-250320202/>. [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [17] V. Ventura. "Crear G-code con cura", 2014. [Online]. Available: <http://polaridad.es/gcode-cura-imprimir-3d/> [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [18] A. Regidor, "Impresión 3D", 2016. [Online]. Available: <https://www.impresion3daily.es/> [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [19] J. Lugo, "Diseño asistido por computador CAD para diseños industriales. Ideasdi.com. [Online]. Available: <https://ideasdi.com/recursos/disenio-asistido-por-computador/> [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [20] E. Salazar-Hornig and S. Medina, "Minimización del makespan en máquinas paralelas idénticas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia utilizando un algoritmo genético", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 14, no. 1, pp. 43-51, 2013.
- [21] E. Cárdenas Gómez, R. Poveda Chaves and O. García Hurtado, "Combinatorial optimization np-hard problem solved by using the quadratic assignment problem (QAP) solution through a parallel genetic algorithm on GPU", *Visión electrónica*, vol. 11, no. 2, pp. 146-151, 2018.
- [22] A. Mexicano Santoyo, J. Pérez Ortega, G. Reyes Salgado, and N. Almanza Ortega, "Characterization of Difficult Bin Packing Problem Instances oriented to Improve Metaheuristic Algorithms", *Computación y Sistemas*, vol. 19, no. 2, 2015. [23] R. E. Korf, "A complete anytime algorithm for number partitioning", *Artificial Intelligence*, vol. 106, pp. 181- 203, 1998.
- [24] H. Yanasse, N. Soma and N. Maculan, "An algorithm for determining the K-best solutions of the one-dimensional Knapsack problem", *Pesquisa Operacional*, vol. 20, no. 1, pp. 117-134, 2000.

- [25] I. P. Jorge Torres, “Fabricación avanzada, más allá de la industria 4.0”, 2017. [Online]. Available: https://www.minsait.com/sites/default/files/newsroom_documents/fabricacion_avanzada_mas_alla_de_la_industria_4.pdf. [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [26] Tiehua Cao and A. Sanderson, "Task sequence planning using fuzzy Petri nets", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 25, no. 5, pp. 755-768, 1995.
- [27] P.M Vallejo, “Regresión”, 2012. [Online]. Available: <https://web.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/Regresion.pdf>. [Accessed: 24- Nov- 2020]
- [28] A. Mendoza, C. Solano, D. Palencia and D. García, "Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 27, no. 3, pp. 348-360, 2019.
- [29] D. Montgomery, “Control Estadístico De La Calidad”, *Grupo Editorial Limusa*, 2006.
- [30] B.S. López, “Mantenimiento Productivo Total (TPM)”, 2019. [Online]. Available: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/mantenimiento-productivo-total-tpm/>. [Accessed: 23-Nov--2020]
- [31] S. S. Restrepo, “Modelado por deposición fundida”. 2017. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/#!> [Accessed: 23- Nov- 2020]
- [32] J. Ho and Y. Chang, "Heuristics for minimizing mean tardiness form parallel machines", *Naval Research Logistics*, vol. 38, no. 3, pp. 367-381, 1991.
- [33] Y. Oh, P. Witherell, Y. Lu and T. Sprock, "Nesting and scheduling problems for additive manufacturing: A taxonomy and review", *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101-492, 2020 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101492>. [Accessed: 14- Feb- 2021]
- [34] Ana S. Ariza, “Minimizar el número de trabajos tardíos en m máquinas paralelas idénticas atendiendo a restricciones de disponibilidad”, 2021, GitHub [Online]. Available: www.github.com/sofiaariza/SecuenciacionTrabajosCAP [Accessed: 26-May- 2021]

IX. ANEXOS

TABLA XI
TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo (propio o terceros)	Tipo de Archivo (PDF, HTML, Excel, Word...)
1	2020208–A.Anexo1. Encuesta: Calificación del servicio de impresión 3D en el centro de automatización de procesos (CAP)	Propio	Excel
2	2020208-A.Anexo2. Costos del servicio de impresión 3D	Tercero (Centro de automatización)	Word
3	2020208-A.Anexo3. Justificación prioridades grupos de interés	Propio	Word
4	2020208-A.Anexo4. Entrevista con el coordinador del CAP Juan David Contreras: Entendimiento de las necesidades del cliente	Propio	Word
5	2020208-A.Anexo5. Plan De Recolección de Datos (PRD)	Propio	Excel
6	2020208–A.Anexo6. Diagrama de flujo: Elaboración de pedidos de impresión 3D	Propio	Word
7	2020208–A.Anexo7. Hoja de Trabajo Situación Actual	Propio	Word
8	2020208-A.Anexo 8. Detalles De Impresión 3D	Propio	Excel
9	2020208-A.Anexo9. Regresión Múltiple	Propio	Excel
10	2020208-A.Anexo10. Hoja De Recolección De Datos	Propio	Excel
11	2020208-A.Anexo11. Modelo De Simulación en SIMIO	Propio	Word
12	2020208-A.Anexo12. Regresión Múltiple Con Nuevos Factores	Propio	Excel
13	2020208-A.Anexo13. Revisión De Literatura	Propio	Word

14	2020208-A.Anexo14. Matriz AHP	Propio	Excel
15	2020208-A.Anexo15. Cronograma En Project	Propio	Project
16	2020208-A.Anexo16. Simulación Montecarlo de KPI's según disponibilidad del monitor	Propio	Excel
17	2020208-A.Anexo17. Simulación Montecarlo de KPI's según disponibilidad del CAP	Propio	Excel
18	2020208-A.Anexo18. Prueba de optimalidad del algoritmo de Moore	Propio	Word
19	2020208-A.Anexo 19. Tercera condición planteada por Ho y Chang	Propio	Word
20	2020208-A.Anexo20. Diagrama de flujo propuesto	Propio	Word
21	2020208-A.Anexo21. Formato para dar trazabilidad al proceso	Propio	Word, Google Forms
22	2020208-A.Anexo22. Manual de Usuario	Propio	Word
23	2020208-A.Anexo23. Manual de Instalación	Propio	Word
24	2020208-A.Anexo24. Simulación de KPI's para validación de la propuesta de mejora	Propio	Excel
25	2020208-A.Anexo25. Instancias evaluadas etapa mejorar	Propio	PDF
26	2020208-A.Anexo26. Evaluación del tiempo computacional de códigos implementados	Propio	Excel
27	2020208-A.Anexo27. Instancias evaluadas etapa controlar	Propio	PDF