

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



JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO
Director Carrera Ingeniería Industrial



ÁLVARO FIGUEROA CABRERA
Director Proyecto de Diseño



HÉCTOR FABIO BONILLA LONDOÑO
Jurado 1



CARLOS ALBERTO OLARTE MENESES
Jurado 2

Santiago de Cali, Julio 30 de 2021

Ingeniero

Jorge Enrique Álvarez Patiño

Director Carrera de Ingeniería Industrial

Pontificia Universidad Javeriana

Cali

Asunto: Carta de aval para la entrega definitiva del documento Proyecto de Diseño 2020208

Por medio de la presente doy aval para la entrega final a la carrera, del documento que soporta el Proyecto de diseño 2020208, bajo mi dirección, desarrollado por los estudiantes Andrea Ramírez Rodríguez y Daniel Alejandro Segura Santander titulado "*Diseño de una metodología para secuenciar trabajos en el CAP de la PUJ Cali*".

Cordialmente

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alvaro Figueroa Cabrera', written in a cursive style.

Alvaro Figueroa Cabrera

Director de Proyecto de Diseño 2020208

Profesor Asociado Facultad de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, Julio 30 de 2021

Ingeniero Jorge Enrique Álvarez Patiño
Director Carrera de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Ciudad,

Asunto: Carta socialización de propuesta Proyecto de Diseño 2020208

Por medio de la presente doy constancia de que los estudiantes Andrea Ramírez Rodríguez y Daniel Alejandro Segura Santander socializaron la propuesta titulada “Diseño de una metodología para secuenciar trabajos en el CAP de la PUJ Cali” ante mi como coordinador del CAP.

Cordialmente



Juan David Contreras
Coordinador Centro de Automatización de Procesos



Diseño de una metodología para secuenciar trabajos en el CAP de la PUJ Cali

Andrea Ramírez Rodríguez^{a,c}, Daniel Alejandro Segura Santander^{a,c},
Álvaro Figueroa Cabrera^{b,c}, Juan David Contreras Pérez^d

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

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

^cPontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

^dCoordinador del Centro de Automatización de Procesos

Resumen

La manufactura aditiva por deposición fundida hace parte de una de las seis tecnologías claves que está contribuyendo al inicio de la nueva fabricación avanzada, que tiene como finalidad realizar proyectos de manera ágil y eficiente, generando gran impacto a la sociedad debido a las diferentes áreas en las que puede ser aplicada. La Pontificia Universidad Javeriana Cali, a través del Centro de Automatización de Procesos (CAP), ofrece como valor agregado un servicio de impresión 3D a la comunidad, el cual permite desarrollar un prototipado rápido de los proyectos tanto de estudiantes como de profesores. No obstante, en la actualidad existen algunos problemas en la planeación de pedidos durante la semana de parciales que generan una tardanza de seis días en la entrega de proyectos de impresión y un 35,3% de insatisfacción en los usuarios que hacen uso regular del servicio.

Mediante el presente trabajo, se diseñó una metodología basada en la heurística *Modified Due Date (MDD)* utilizada para resolver el problema de tardanza ponderada total, esta sirve para solucionar el problema de dos máquinas paralelas idénticas, asignando el trabajo con menor holgura en la máquina menos cargada, implementando la heurística mediante un código de programación en lenguaje Visual Basic for Application. Esta heurística fue comparada mediante un modelo matemático diseñado en lenguaje computacional *AMPL*. Dicha propuesta permite una mejor secuenciación de tareas para disminuir los atrasos en las entregas y aumentar la satisfacción de los usuarios que hacen uso de este servicio, dando como resultado una disminución en la tardanza del 82,93% y un aumento en la satisfacción de los usuarios.

Palabras claves: Impresión 3D, Secuenciación de actividades, Tardanza, máquinas paralelas idénticas, heurísticas.

Abstract

Additive manufacturing by fused deposition is part of one of the six key technologies that is contributing to the beginning of the new advanced manufacturing, which aims to carry out projects in an agile and efficient way, generating a great impact on society due to the different areas in those that can be applied. The Pontificia Universidad Javeriana Cali, through the Process Automation Center (CAP), offers as an added value a 3D printing service to the community, which allows the development of a rapid prototyping projects of both students and teachers. However, there are currently some problems in the planning of orders during the exams week that generate a delay of six days in the delivery of printing projects and a 35.3% dissatisfaction in users who make regular use of the service.

Through the present work, a methodology was designed based on the Modified Due Date (MDD) heuristic used to solve the problem of total weighted delay, however, this serves to solve the problem of two identical parallel machines, assigning the work with less slack in the less loaded machine, implementing the heuristics through a programming code in Visual Basic for application (VBA). This heuristic was compared using a mathematical model designed in computer language *AMPL*. This proposal allows a better sequencing of tasks to reduce delays in deliveries and increase the satisfaction of users who make use of this service, resulting in a decrease in delay of 82.93% and an increase in customer satisfaction.

Keywords: 3D printing, Scheduling, Tardiness, identical parallel machines, heuristics.

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	11
IV. ANALIZAR	15
A. Análisis de Causas	15
B. Revisión de literatura	17
C. Exploración de ideas y selección de alternativas	20
D. Objetivos	21
E. Plan de trabajo (PdT)	21
V. MEJORAR	22
A. Desarrollo del diseño de la solución	22
B. Validación del diseño propuesto	25
VI. CONTROLAR	29
A. Medición de los impactos.	29
B. Estandarización de la solución – POE’S (plan de control).	30
C. Conclusiones.	30
D. Recomendaciones.	31
VII. GLOSARIO	32
VIII. REFERENCIAS	33
IX. ANEXOS	35

Índice de Tablas	
TABLA I.....	6
TABLA II.....	7
TABLA III.....	8
TABLA IV.....	9
TABLA V.....	10
TABLA VI.....	11
TABLA VII.....	13
TABLA VIII RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO.....	14
TABLA IX PLAN DE TRABAJO.....	21
TABLA X.....	35

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.....	6
Fig. 3. Matriz de Poder Vs Interés de los Stakeholders representada en plano cartesiano.....	8
Fig. 4. Mapa de procesos para la atención de solicitudes de impresión 3D.....	11
Fig. 5. Distribución de la carga según el tipo de impresora 3D.....	12
Fig. 6. Proporción De Colores Utilizados en los Pedidos.....	13
Fig. 7. Inconformidades detectadas en el servicio de impresión.....	14

Fig. 8. Diagrama de Causa y Efecto para el servicio de impresión 3D en el CAP..... 15

Fig. 9. Palabras claves para crear el mapa. 17

Fig. 10. Visualización de superposición. 18

Fig. 11. Esquema de la metodología 25

Fig. 12. Tardanza total de las heurísticas y modelo matemático..... 26

Fig. 13. Tardanza total en minutos 26

Fig. 14. Porcentaje de desviación frente al óptimo..... 27

Fig. 15. Desviación frente al óptimo 27

Fig. 16. Gap (% de optimalidad)..... 28

Fig. 17. Tiempo de computación en segundos..... 28

Fig. 18. Tiempo de computación en segundos (gráfica)..... 29

I. PROJECT CHARTER

Descripción (<i>Business case</i>)		Planteamiento del problema (<i>Problem statement</i>)			
El presente proyecto busca disminuir los atrasos en la entrega de los pedidos presentados en el servicio de impresión 3D ofrecido por el CAP durante la semana de parciales, dado que esta es la principal causa de inconformidades de los usuarios. Por ello, se propone realizar el diseño de una metodología para secuenciar las actividades que debe desempeñar el operario al momento de ingresar a las instalaciones.		El servicio de impresión 3D del CAP en la Pontificia Universidad Javeriana seccional Cali presenta problemas en la gestión de información y el proceso que se lleva a cabo, generando una tardanza de uno a seis días en la entrega de proyectos de impresión y un 35,3% de insatisfacción en los usuarios que hacen uso regular del servicio.			
Impacto de los actores (<i>Stakeholder's business needs</i>)		Restricciones	Especificaciones	Marco legal	
Grupo de Interés	Impacto	<ul style="list-style-type: none"> Personal CAP y monitora: Cumplimiento del plazo de respuesta de atención a los usuarios de acuerdo al tipo de pedido realizado. Profesores y estudiantes: Fecha límite de entrega de trabajos de impresión a profesores y carga de notas a la facultad. 	<ul style="list-style-type: none"> Personal CAP y monitora: Mantener una adecuada secuenciación de tareas de modo que sean atendidas todas las solicitudes de la comunidad universitaria en un plazo máximo de dos - siete días por pedido. Profesores y estudiantes: Recibir el trabajo solicitado dentro del plazo de atención definido por el CAP con la calidad adecuada y el cumplimiento de sus requerimientos. 	<ul style="list-style-type: none"> Personal CAP y monitora: Contrato de monitor establecido por la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Profesores y estudiantes: Reglamento del profesor estipulado por la Pontificia Universidad Javeriana Cali. 	
Equipo de diseño	Poder implementar la propuesta de mejora y verificar si generó resultados positivos o negativos teniendo en cuenta a los <i>stakeholders</i> .				
Personal CAP	Impacto positivo, reduce problemas de cumplimiento en la demanda e inconformidad de usuarios.				
Profesores	Impacto positivo, podrán acceder al servicio adecuadamente y dejar trabajos a los estudiantes sin percances.				
Estudiantes	Impacto positivo, podrán acceder al servicio adecuadamente.				
Monitor CAP	Impacto positivo, al hacer uso de la secuenciación de actividades permite entregar el proyecto en el tiempo previsto.				
Indicadores de Desempeño (<i>KPI's</i>)					
Variable	Actualidad	Meta			
Clientes satisfechos con el servicio prestado [usuarios]	De un total de 66 encuestas, el 64,7% de usuarios presentan satisfacción con el servicio prestado.	La meta es obtener un porcentaje de satisfacción del 74,7%, con el objetivo de prestar un servicio que cumpla con los requerimientos del cliente.			
Tardanza. [días]	De un total de 258 pedidos atendidos, el 70,54% corresponde a pedidos regulares, es decir que pueden ser desarrollados en un intervalo de cero a cinco horas, donde en un periodo de parciales se realizaron máximo 49 pedidos los cuales generan una tardanza de seis días.	La meta constituye establecer una tardanza de solicitudes de cuatro días en los pedidos regulares durante el periodo de parciales, dado que representan la mayoría de órdenes realizadas actualmente.			
Objetivo general (<i>Goal statement</i>)					
Diseñar mediante una metodología para solucionar el problema de programación de los pedidos de impresión 3D en el propósito de reducir la tardanza en la entrega de pedidos.					
Objetivos específicos (<i>Project scope</i>)					
<ul style="list-style-type: none"> Establecer las restricciones del problema para realizar una adecuada secuenciación de actividades. Identificar las variables que inciden en el proceso para diseñar la metodología que pueda abordar el problema. Diseñar metodología de solución para la planificación de pedidos, asignación de tareas. Validar el impacto de la propuesta mediante una prueba piloto. 					
Plan de Trabajo (<i>Project Plan</i>)				Equipo de trabajo (<i>Team members</i>)	
Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Área IISE	Nombre	Rol
Buscar metodologías que se ajusten a la secuenciación de actividades.	04/01/2021	22/02/2021	Investigación y análisis de operaciones.	Andrea Ramirez Rodríguez	Standard setter
Seleccionar metodología más apropiada.	23/02/2021	26/02/2021	Investigación y análisis de operaciones.	Andrea Ramirez Rodríguez	Standard setter
Adaptar la metodología seleccionada mediante el código de programación	1/03/2021	26/03/2021	Gestión de ingeniería y operaciones.	Daniel Alejandro Segura Santander	Compromiser
Realizar manuales para que el personal del CAP pueda conocer el proceso a llevar a cabo.	29/03/2021	02/04/2021	Investigación y análisis de operaciones.	Daniel Alejandro Segura Santander	Compromiser
Medir la tardanza en la entrega de proyectos de impresión y Obtener	05/04/2021	30/04/2021	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Andrea Ramirez Rodríguez	Standard setter

las perspectivas de los usuarios como resultado de la prueba piloto.					
--	--	--	--	--	--

II. DEFINIR

A. Contexto y Justificación

La impresión 3D, aunque pareciera tener una aplicación reciente, fue creada hace más de 30 años por el empresario Charles W. Hull más conocido como Chuck Hull, quien en 1983 ideó el primer método para la impresión 3D y en 1984 patentó la primera máquina [1]. No obstante, es a comienzos del siglo XXI donde la impresión 3D ha tenido más acogida alrededor del mundo para el diseño y creación de artefactos con el fin de obtener piezas o repuestos necesarios en tiempos más cortos en el área de Medicina, Ingenierías, Arquitectura, entre otros [2].

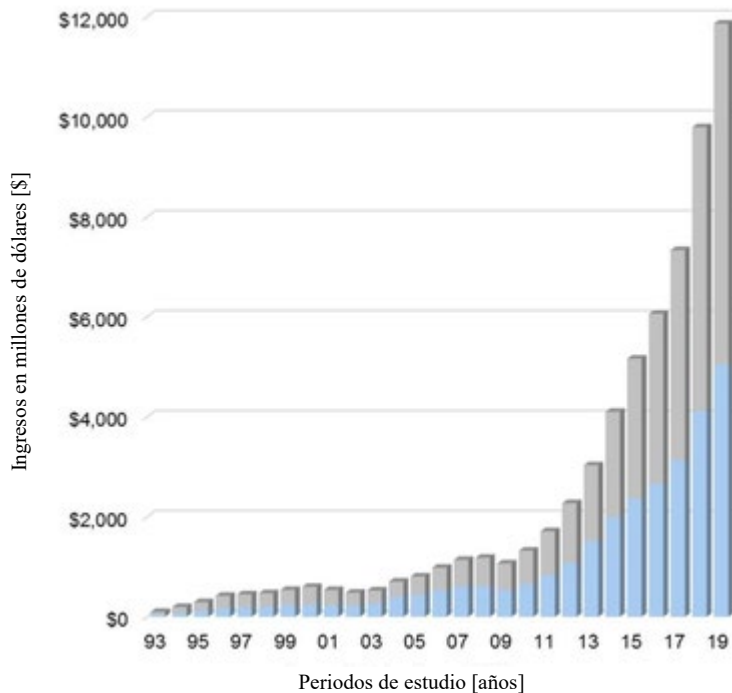


Fig. 1. Ingresos proporcionados por la manufactura aditiva modificado de [3]

En función de lo antes expuesto a partir de la Fig. 1. es posible observar, mediante la barra azul y gris respectivamente, el crecimiento de los ingresos que ha tenido la industria de productos y servicios entre los años 1993 a 2019. Durante el año 2019 la manufactura aditiva creció en un 21,2%, alcanzando los 11 900 000 000 USD [3], lo cual explica la importancia actual de este sector y la razón por la cual debe ser analizado en profundidad. Actualmente en Colombia se está optando por implementar impresiones 3D en centros educativos con el objetivo de no solo aprender la teoría, sino aplicarla en hechos prácticos mediante la creación de prototipos relacionados a las asignaturas que el estudiante cursa [4].

En ese propósito, el Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) Cali posee un servicio de impresión 3D altamente demandado por estudiantes y profesores de la institución, con un pico máximo de 171 usuarios atendidos en 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. Este es llevado a cabo en varios pasos, siendo iniciado mediante un correo, con las solicitudes que llegan al servicio de impresión autorizadas por el profesor encargado de la materia, 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 (si el producto debe ser detallado o no, ya que su tiempo de procesamiento variará en función de ello), la utilidad y tipo de proyecto (si es para una tesis, semillero, premio o proyecto de clase). Luego, al verificar que estas condiciones hayan sido cumplidas, se agenda la impresión y mediante el programa “*Ultimaker Cura*” se convierte el archivo en código *G* para que la impresora pueda leerlo y, finalmente, se imprima la pieza; una vez haya sido terminada se le notifica al estudiante 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.

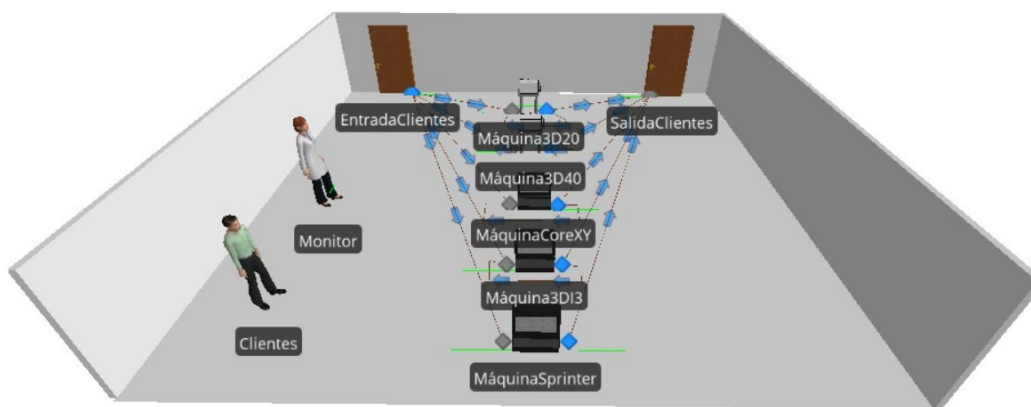


Fig. 2. Diagrama del proceso de impresión 3D del CAP.

Frente a ello, 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 recepción deficiente de pedidos:** debido a la alta demanda del servicio durante la semana de parciales [TABLA I], 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 y terminados (sobre todo cuando los correos llegan sin remitente, autorización u otros requisitos necesarios), lo que genera que existan pedidos atrasados o en su defecto se realicen como el monitor entienda.
- ❖ **La atención insuficiente a las solicitudes:** el monitor a veces presenta dificultades en la atención de clientes puesto que cuando se encuentra en semana de parciales, se ausenta de su área de trabajo y no atiende los pedidos del CAP lo que hace que las solicitudes pendientes de impresión incrementen. Así mismo, esta monitoría se hace regularmente dos horas consecutivas al día cada semana, lo cual genera en las máquinas, tiempos de inactividad prolongados, que bien podrían ser aprovechados para la realización de pedidos.
- ❖ **La ausencia de una adecuada secuenciación de actividades:** el desconocimiento de cómo distribuir las actividades contribuye, en gran medida, a las demoras en el sistema y dificulta la atención de la demanda produciendo tardanza en la entrega de los proyectos de impresión. Resultado de ello, se presenta la alternativa de operar durante las noches las actividades de mayor duración.

Adicionalmente, la información suministrada por el Centro de Automatización de Procesos se encuentra incompleta, porque se observan registros de pedidos que no están diligenciados y no se posee antecedentes de quejas por parte de los usuarios debido a que no se ha optado por recolectarla, sin embargo, el coordinador manifiesta dichos inconvenientes. A continuación, en la TABLA I se evidencian los cambios en la demanda de acuerdo con la carga académica que reciben los estudiantes durante períodos de parciales, de forma que se obtenga un mayor entendimiento del panorama actual del servicio. Por otro lado, 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] (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 del CAP

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%

Fuente: base de datos suministrada por el coordinador del CAP.

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 que se lleva a cabo, generando una tardanza de hasta seis días en la entrega de proyectos de impresión y un 35,3% de insatisfacción en los usuarios que hacen uso regular del servicio, este porcentaje fue obtenido mediante una encuesta realizada en Google Forms (teniendo en cuenta solo los espacios diligenciados) [Anexo 1]. En conclusión, se justifica 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 no se preste de manera eficiente.

El beneficio principal del proyecto es desarrollar una propuesta de mejora que permita al Centro de Automatización de Procesos mejorar la satisfacción de los clientes al recibir los pedidos, lo cual se espera lograr al clasificar los pedidos en pendientes y terminados, y realizar un efectivo agendamiento de actividades a ejecutar, tal que sea posible satisfacer y retener a los clientes. El beneficio potencial de la propuesta permitirá al CAP prestar un servicio de impresión más competitivo, que genere un valor añadido al usuario 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. Para la clasificación y priorización de estos grupos, se usó la matriz poder vs interés. En esta, en un plano cartesiano se ubican los grupos según el sector al que pertenecen, generando una ponderación de poder e interés a los *stakeholders*. Para verificar las ponderaciones otorgadas, se realizó una reunión con el coordinador del CAP, justificando así, en escala de cero a diez, la importancia de los interesados frente al proyecto (0 más baja y 10 más alta importancia). Por otro lado, para determinar la prioridad y el puntaje obtenido de cada interesado, se utilizó la Hoja de Trabajo de Grupos de Interés [Anexo 3]. Así mismo, en la TABLA II, se observa que existe un empate en el puntaje entre profesor y estudiante, por lo cual, se designó al profesor en la segunda prioridad ya que es usuario del sistema y a su vez encargado de asignar actividades de impresión 3D.

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
Equipo de diseño	Encargados de mejorar el servicio de impresión 3D.	El impacto es implementar adecuadamente la propuesta de mejora y verificar si generó resultados positivos o negativos teniendo en cuenta a los <i>stakeholders</i> .	8	10	Gestionar atentamente (primer cuadrante).	19	1
Personal CAP	Controlar y monitorear el proceso de impresión 3D.	Impacto positivo, reduce problemas de cumplimiento en la demanda e inconformidad de usuarios.	8	10	Gestionar atentamente (primer cuadrante).	16	2
Profesores	Proponen 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	3
Estudiantes	Clientes finales del servicio ofrecido por el CAP.	Impacto positivo, podrán acceder al servicio adecuadamente.	6	10	Gestionar atentamente (primer cuadrante).	9	4
Monitor CAP	Encargado de llevar a cabo los pedidos y aprobar las solicitudes.	Impacto positivo, al hacer uso de la secuenciación de actividades permite entregar el proyecto en el tiempo previsto.	2	7	Mantener informado (cuarto cuadrante).	7	5

A partir de la Fig. 3. se presenta la matriz poder vs interés de las partes interesadas antes mencionadas de acuerdo con su clasificación, mostrando que se debe gestionar atentamente al personal del CAP y a los estudiantes; mantener informado al monitor y satisfechos a los profesores.

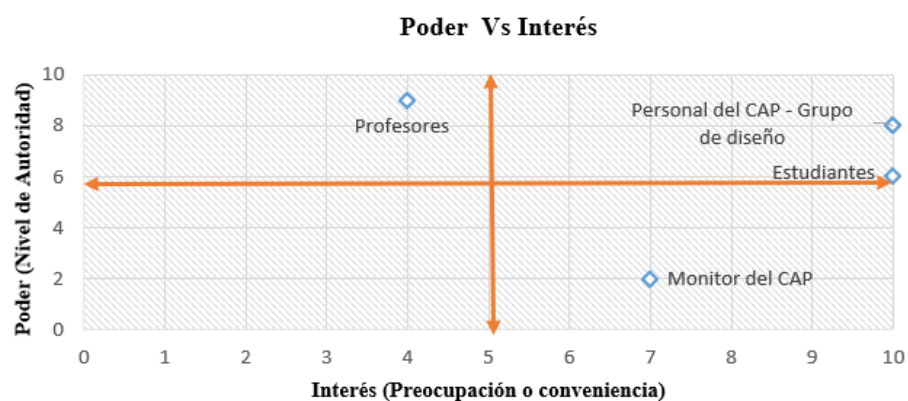


Fig. 3. Matriz de Poder Vs Interés de los Stakeholders representada en plano cartesiano.

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 y transformarlas en requisitos, con el objetivo de establecer las variables sujetas al proceso, restricciones y especificaciones de diseño 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, Normas	Importancia o Efecto de las leyes
Equipo de diseño	Construir una propuesta de mejora para la eficiente prestación del servicio de impresión 3D en el CAP.	Tiempo requerido para llevarlo a cabo	Tiempo disponible (2 horas diarias) para desarrollar el proyecto debido a que existen otras asignaturas que cumplir	Buscar alternativas frente a los problemas que actualmente existen en el CAP	N/A	N/A
Personal CAP	Determinar las actividades que el monitor debe desempeñar para atender a la demanda.	Tiempo de entrega del proyecto de impresión	Disponibilidad del monitor (2 horas diarias) durante la jornada laboral para la prestación del servicio en el CAP.	Mantener el correcto funcionamiento del CAP propiciando la oportuna atención de las solicitudes de impresión.	Contrato de monitor establecido por la Pontificia Universidad Javeriana Cali	Definir los roles que debe desempeñar y los objetivos a cumplir
Profesores	Al hacer uso del servicio deben recibir sus proyectos de impresión con la menor tardanza posible (al igual que los de sus estudiantes), teniendo en cuenta los límites de atención del CAP y les debe ser prestado un servicio que le proporcione satisfacción.	Tiempo de entrega del proyecto de impresión y Satisfacción de los usuarios	Cumplimiento de la fecha límite de entrega de notas a la facultad y especificaciones requeridas para solicitar el servicio de impresión.	Recibir el trabajo solicitado dentro del plazo de atención definido por el CAP (dos - siete días teniendo en cuenta el tipo de pedido) 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	El proyecto que se necesita imprimir debe ser entregado en el tiempo establecido (de dos a siete días dependiendo del tipo de pedido), teniendo en cuenta los límites de atención del CAP. Por otro lado, le debe ser prestado un servicio que le proporcione satisfacción.	Tiempo de entrega del proyecto de impresión y Satisfacción de los usuarios	Desconocimiento de las especificaciones a enviar por correo para hacer uso del servicio (al incumplir con las especificaciones, el pedido no es posible entregarlo a tiempo).	Recibir la impresión dentro del plazo de dos a siete días (según el tipo de pedido) para cumplir con la fecha de entrega propuesta por el profesor y recibir el proyecto acorde con sus requerimientos.	N/A	N/A

Monitor CAP	Gestionar de manera eficiente la secuencia de las actividades a realizar de manera que puedan ser atendidas todas las solicitudes que recibe el CAP.	Tiempo de entrega del proyecto de impresión.	Atender obligaciones académicas propias, mientras desempeña su rol como monitor (dos horas diarias).	Mantener una secuencia de tareas adecuada de modo que atienda todas las solicitudes de la comunidad universitaria en un plazo máximo de dos -siete días por pedido.	Contrato de monitor establecido por la Pontificia Universidad Javeriana Cali	Definir los roles que debe desempeñar y los objetivos a cumplir.
--------------------	--	--	--	---	--	--

En función de la TABLA III, es importante recalcar los requisitos que cada grupo de interés posee con relación al proyecto, para tener un mayor conocimiento de cómo establecer una alternativa de mejora. Por ello, aunque la maquinaria utilizada por el CAP en el área de impresión 3D no hace parte de los interesados, es de gran importancia mencionar que provee restricciones al servicio debido a la capacidad con la que cuenta, ya que cada una posee unas dimensiones diferentes adaptadas a las necesidades de productos que requieren los usuarios. Lo anterior, 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 constituye 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 su disponibilidad y materiales, admitidos por las mismas. No obstante, 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 sin mano de obra cualificada para tal operación, actualmente se encuentran en etapa de prueba y mantenerlas activas constantemente podría provocar averías en las mismas, por lo cual, este estudio se centrará únicamente en estas dos primeras.

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

Impresoras	Materiales admitidos para utilizar	Disponibilidad en las instalaciones	Dimensiones (mm)	Capacidad (Horas/semana)
Impresora 3D40	PLA	1	255x150x170	100
Impresora 3D20	PLA	1	230x150x140	100
Impresora 3DI3	PLA, ABS	1	180x190x200	44
Impresora 3D CAP Sprinter	PLA, ABS	1	200x200x240	44
Impresora 3D CAP Core XY	PLA, ABS	1	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 recolectaron los datos sobre las variables necesarias para la etapa Analizar. Para la elaboración de este, se debió 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. De esta forma, es importante recalcar que 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 encuestas desarrolladas mediante la herramienta Google Forms en el periodo 2020-2.

TABLA V
PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Requisitos	Definición operativa	Aspectos clave	Criterios	Recursos de medición
El proyecto que se necesita imprimir debe ser entregado en el tiempo establecido, teniendo en cuenta los límites de atención del CAP para cumplir con los plazos de la demanda pactada. (Regular - dos días, Mediano - cuatro días y Grande - siete días)	El proyecto debe ser gestionado para poder ser entregado con la calidad adecuada y en el plazo establecido, dependiendo del tipo de pedido (Regular, Mediano y Grande).	Oportunidad en la entrega.	Solo se tuvieron en cuenta las casillas de Excel completamente diligenciadas en la base de datos.	Los datos se obtuvieron de la base de datos suministrada por el CAP durante el periodo 2019-1 a 2020-1
La atención prestada mediante el servicio debe proporcionar satisfacción al usuario.	El proyecto debe ser entregado de acuerdo con los requerimientos solicitados por el cliente y el tiempo establecido, de forma que el usuario se sienta satisfecho con el servicio prestado.	Nivel de agrado del usuario con el servicio prestado.	La variable se midió mediante un integrante del grupo quien envió encuestas a usuarios del servicio de impresión 3D. El único criterio fue verificar que los usuarios fueran estudiantes de pregrado o profesores, ya que son los clientes potenciales del servicio.	Google Forms.

Nota: Para establecer un panorama de lo que ocurre actualmente, también se tuvo en cuenta la demanda del color utilizado por los usuarios, cantidad de material comprado, maquinaria más demandada por el CAP y proporción de pedidos que no fueron atendidos por el CAP o contaron con problemas durante su ejecución.

Dado que se hizo uso de encuestas como herramienta para determinar el porcentaje de satisfacción de los usuarios con el servicio prestado actualmente por el CAP, a continuación, se presenta el cálculo de la muestra (2) que fue encuestada con base al tamaño de la población que hace uso de este servicio en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, con un nivel de confianza del 95% y un error máximo permitido del 10%. Para establecer el número de la población, se solicitó información del número de estudiantes actuales 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).

$$n_0 = \frac{(Z)^2(p*(1-p))}{\varepsilon^2} = \frac{(1,96)^2(0,5*(1-0,5))}{0,10^2} = 96 \quad (1)$$

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{n_0}{N}\right)} = \frac{96}{1 + \left(\frac{96}{1115}\right)} = 88 \quad (2)$$

Un KPI es un medidor de desempeño que se utiliza para sintetizar información y tomar decisiones respecto al estado actual de un proceso, proyecto, estrategia o campaña y de esta forma definir una línea de acción futura para monitorear el rendimiento de tal estrategia. A continuación, la TABLA VI, presenta los indicadores de desempeño de cada variable de estudio.

TABLA VI
INDICADORES DE DESEMPEÑO

Variable	Objetivo	Descripción	Indicadores
Tardanza [Días]	Es útil para identificar el tiempo adicional promedio que requieren los pedidos para ser entregados y reducirlo para atenderlos de manera oportuna.	Los datos fueron obtenidos mediante una simulación en el programa Simio®, en la que un integrante del equipo se encargó de realizar un paralelo entre la fecha de emisión de la solicitud, el plazo de entrega y la fecha de entrega del pedido de impresión.	$Tardanza = \text{Plazo de entrega} - \text{tiempo de entrega del pedido}$ <p style="text-align: right;">(3)</p>
Cientes satisfechos con el servicio prestado [Clientes]	Es útil para conocer el nivel de satisfacción que poseen los usuarios en la actualidad para realizar un paralelo al implementar una mejora.	Los datos se obtuvieron mediante encuestas para conocer el nivel de satisfacción de los usuarios con el servicio. Utilizando como criterio la calidad del pedido, el cumplimiento en el tiempo de entrega y la oportunidad en la respuesta.	$\% \text{ Satisfacción} = \frac{\text{Clientes satisfechos}}{\text{Clientes totales}}$ <p style="text-align: right;">(4)</p>

B. Medición del sistema actual

Diagnóstico actual:

Para conocer los detalles del proceso de atención de solicitudes por el CAP la Fig. 4. muestra el mapa de procesos, donde se incluyen los procesos estratégicos, operativos y de apoyo que llevan a la entrega final del producto terminado. Se resalta que la planificación de pedidos de impresión constituye una de las actividades más importantes a desempeñar en los procesos operativos para garantizar una satisfactoria atención de la demanda, por lo cual esta será inspeccionada posteriormente.

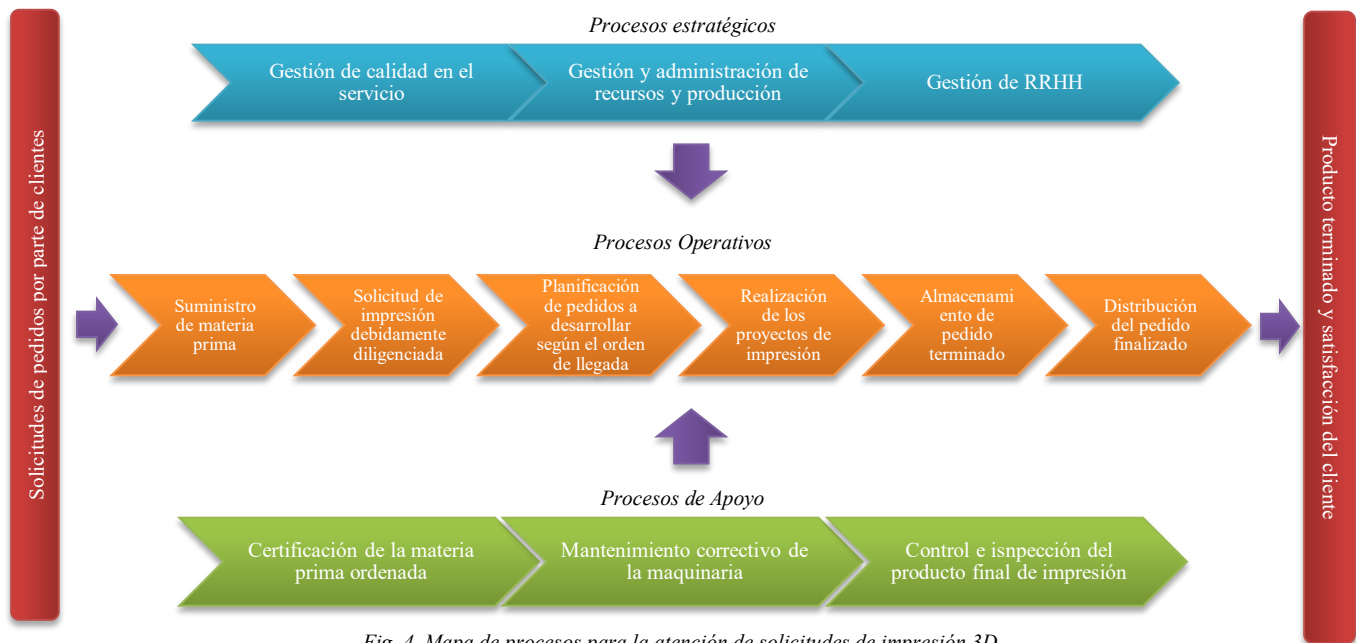


Fig. 4. Mapa de procesos para la atención de solicitudes de impresión 3D.

Dado que el Centro de Automatización de Procesos no cuenta con un diagrama de las actividades que desempeña, fue desarrollado un diagrama de flujo en el propósito de comprender el panorama actual que engloba la prestación del servicio de impresión 3D mediante la información proporcionada por el CAP [Anexo 6] en el que fueron definidos los puntos de control y mejora. En este es posible encontrar que, en ocasiones la falta de conocimiento de los parámetros que deben ser diligenciados por el estudiante, así como la demora en la atención de las solicitudes de impresión por productos en cola y la ejecución de pedidos defectuosos no permite continuar con el proceso de impresión 3D. Así mismo, para determinar la situación actual y comprender el panorama general presentado actualmente en el CAP se hizo uso de la Hoja de Trabajo de Situación Actual [Anexo 7] para recolectar datos sobre el desempeño actual y observar el cumplimiento de las expectativas del cliente.

Debido a esto, fue posible encontrar que las máquinas más utilizadas para la atención de los usuarios fueron la 3D40 y 3D20 durante el periodo 2019 a 2020-1 como se refleja en la Fig. 5., dado que a inicios de 2019 el CAP únicamente contaba con las dos máquinas antes mencionadas y la 3DI3 fue incorporada paulatinamente ya que primero debía pasar por un corto periodo de evaluación para atender a los usuarios, sin embargo, en periodos posteriores se utilizó para la atención de solicitudes de impresión con regularidad. 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 estas fueron desarrolladas por el Centro de Automatización de Procesos a inicios del periodo 2020-1 y aún se encuentran en evaluación para prestar servicio al público. La información mostrada en la Fig. 5., fue obtenida mediante la base de datos suministrados por el CAP.

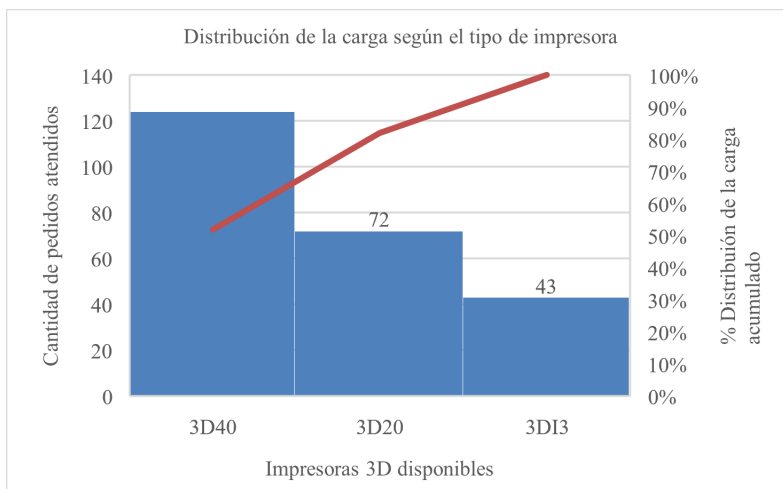


Fig. 5. Distribución de la carga según el tipo de impresora 3D.

Por otro lado, el porcentaje de pedidos que no fueron atendidos en el CAP durante los periodos académicos de 2019 a 2020-1 constituyeron un 2,71%, los cuales tuvieron que ser atendidos por el monitor en otras instalaciones dentro de la universidad como lo son el Laboratorio de Electrónica y Arquitectura. Además, 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. Adicional, al acceder al CAP, se observó que durante el proceso de impresión la boquilla al no contar con un mantenimiento periódico (limpieza), obstruye material y la manera en que el operario la destapa es peligrosa para él y la máquina, debido a que se hace con un taladro, aunque las máquinas vienen con una herramienta específica para dicho proceso.

En cuanto a la cantidad de material adquirido [Anexo 8] durante el año 2019 fueron comprados 9 kg de PLA y se utilizaron 10,58 kg, lo cual indica una falla en los registros ya que el material que fue proporcionado provisionalmente por otras dependencias de la universidad (como el Laboratorios de electrónica y Arquitectura), no está siendo contabilizado, así como las pérdidas, por tanto, no es posible cuantificar el inventario resultante de cada periodo académico. De otro lado, durante el año 2020 fueron adquiridos 31 kg de PLA de los cuales se utilizaron 0,49kg durante el periodo de enero a junio, consecuencia de la coyuntura. Es pertinente aclarar que dichas pérdidas debido a errores en la impresión no son contabilizadas, no por el hecho de no contar con una herramienta que permita medir el gramaje de material, sino, debido a la falta de Gestión de la Coordinación actual del CAP.

Al estudiar las preferencias en cuanto al color de las piezas requeridas por parte de estudiantes y profesores, predomina el uso de color blanco y azul, como se ve en la Fig. 6., la cual fue desarrollada mediante la base de datos suministrados por el CAP. Asimismo, fue posible encontrar que los colores menos solicitados por los usuarios fueron el plateado, verde, naranja y amarillo (el transparente no se tuvo en cuenta para el estudio debido a que fue adquirido para el periodo 2020-1 donde fueron suspendidas las actividades de impresión).

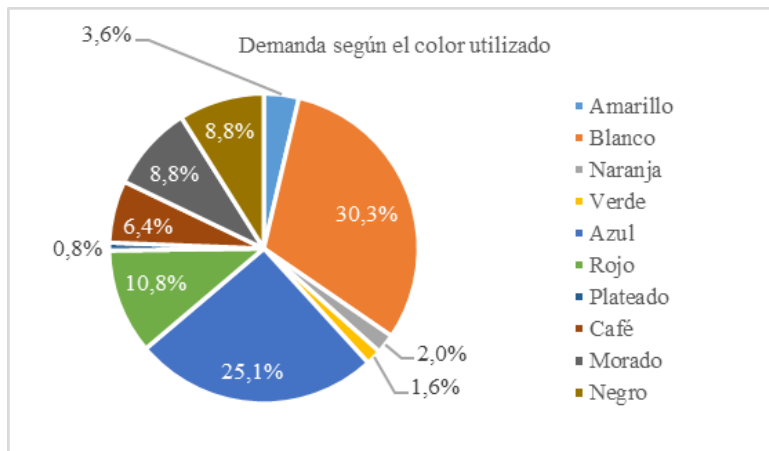


Fig. 6. Proporción De Colores Utilizados en los Pedidos

- **Características relevantes para el estudio.**

En relación con los indicadores de desempeño seleccionados para medir el sistema actual, se encontró que la variable tiempo de procesamiento y cantidad en gramos de material utilizados en el pedido poseen una correlación positiva de 90,87% lo que quiere decir que si la variable cantidad en gramos de material aumenta, la variable de tiempo de procesamiento aumentará proporcionalmente, sin embargo, al no cumplir con los supuestos de normalidad y aleatoriedad e independencia, el modelo no permite realizar estimaciones apropiadas, lo que quiere decir que esto es una correlación sin causalidad. En consecuencia, el modelo únicamente podrá ser descrito por los parámetros que sean ingresados al programa de impresión *Ultimaker Cura* [Anexo 9], razón por la que no se decide hacer una transformación de los datos para su análisis. Sin embargo, con la finalidad de obtener más información del proceso, se decidió agrupar en familias los pedidos realizados y se consultó con el coordinador del Centro de Automatización de Procesos los plazos máximos de entrega. Estos son así: dos días para el regular, cuatro días para el mediano y siete días para el grande, como se observa en la TABLA VII. Al medir dichos tiempos, se encontró una mediana referente a 2,78 horas (dos horas y 45 minutos) de procesamiento. Además, fue posible encontrar que la cantidad de material posee una tendencia central de consumo de 34g de PLA, lo cual se encuentra por debajo de la cantidad estipulada que puede ser utilizada por cada usuario del servicio (100g).

TABLA VII
CLASIFICACIÓN DE FAMILIAS DE PRODUCTOS SEGÚN EL TIPO DE PEDIDO

Tipo de pedido	Tiempo de procesamiento [horas]		Plazo de respuesta máxima [días]	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	Límite inferior	Límite superior			
Regular	0	5	2	182	70,5%
Mediano	5	10	4	52	20,2%
Grande	10	20	7	24	9,3%

Por otro lado, con la finalidad de estimar el promedio de desfase de los tiempos de *Ultimaker Cura* frente a los tiempos de procesamiento reales, con un nivel de confianza del 95% y un error máximo permitido de cuatro minutos fue posible encontrar que el tiempo de desfase promedio es 20,7 minutos (20 minutos y 43 segundos). Así mismo, los pedidos deben considerar el tiempo de montaje, parametrización y desmontaje de la pieza, se obtuvo con un nivel de confianza del 95% que dichos tiempos son de cinco minutos (con un error máximo de 3,58 minutos) y 1,63 minutos (con un error máximo de 0,9 minutos), respectivamente [Anexo 10]. De esta forma es posible afirmar que en promedio el tiempo regular de realización de un pedido oscila en tres horas y 12 minutos, sin embargo, debido a la acumulación de pedidos durante la semana de parciales los pedidos pueden tardar más.

Teniendo en cuenta que la tardanza en la entrega de pedidos constituye un factor de gran importancia en la atención del 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 por el equipo de diseño con el objetivo de determinar la magnitud de dicho tiempo. Es pertinente aclarar que para el desarrollo del modelo únicamente se tuvo en cuenta 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), asimismo para alimentar el modelo de simulación fueron utilizados los tiempos de impresión y la demanda desde el 2019 hasta

el período 2020-1 extraída mediante el [Anexo 8], así como los tiempos de parametrización, montaje y desmontaje expuestos anteriormente.

Para el caso de la medición se tuvo en cuenta que el monitor desempeña sus actividades dos horas al día de lunes a viernes sin una agenda de trabajo específica, sin embargo, se realizaron algunos supuestos para el agendamiento de actividades de forma que pudiera facilitarse la medición. De esta forma, mediante las corridas de simulación se obtuvo que la tardanza en la atención de pedidos durante el periodo 2019 a 2020-1 se encontró en un rango de uno a seis días, lo cual atiende al plazo máximo de respuesta que ofrece el CAP. 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%.

Complemento de lo anterior, con la finalidad de evaluar el sistema actual en relación con la prestación del servicio y la satisfacción que presentan los usuarios al hacer uso de éste, se recolectó información pertinente mediante encuestas cuyo tamaño de muestra fue calculado en 88 personas, las cuales solo fueron contestadas por 66 personas, 58 estudiantes de pregrado y ocho profesores (cinco son profesores que dejan trabajos a sus estudiantes), de los cuales 34 son usuarios del servicio. Al examinar los resultados, existe un porcentaje de satisfacción del 64,7%. No obstante, los usuarios restantes manifestaron presentar problemas en la atención del servicio [Anexo 1], el cual constituye una oportunidad de mejora en el sistema de impresión 3D del CAP.

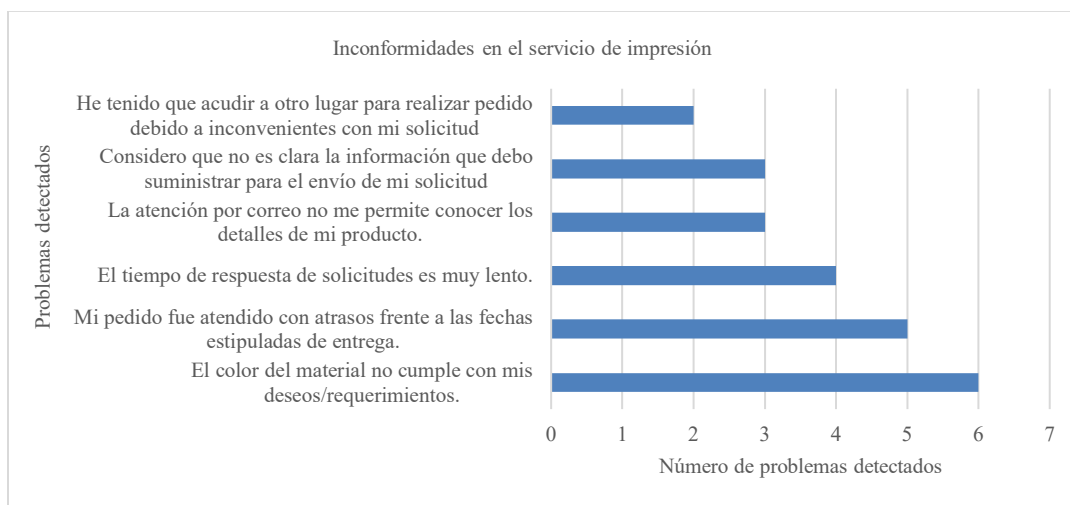


Fig. 7. Inconformidades detectadas en el servicio de impresión.

En la Fig. 7. se observan las principales razones de inconformidad que manifiestan los usuarios. Estas son: ausencia de disponibilidad del color requerido para el desarrollo de los proyectos, retraso frente a la fecha de entrega de pedidos estipulada por el monitor del CAP, la velocidad de atención de solicitudes, desconocimiento de la información que los usuarios deben suministrar en el correo para el envío de sus requerimientos y tener que acudir a otros centros de impresión 3D diferentes al CAP debido a la falta de disponibilidad de impresoras en el sistema.

TABLA VIII
RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

Variable	Actualidad	Meta
Cientes satisfechos con el servicio prestado [Clientes]	De un total de 66 personas encuestadas, el 64,7% de usuarios presentan satisfacción con el servicio prestado.	La meta es obtener un porcentaje de satisfacción del 74,7%, con el objetivo de prestar un servicio que cumpla con los requerimientos del cliente.
Tardanza. [Días]	De un total de 258 pedidos atendidos, el 70,54% corresponde a pedidos regulares, es decir que pueden ser desarrollados en un intervalo de cero a cinco horas, donde en un periodo de parciales se realizaron máximo 49 pedidos los cuales generan una tardanza de seis días.	La meta constituye establecer una tardanza de solicitudes de cuatro días en los pedidos regulares durante el periodo de parciales, dado que representan la mayoría de ordenes realizadas actualmente.

IV. ANALIZAR

A. Análisis de Causas

Una vez finalizada la recolección de datos 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 realizó un estudio de correlación múltiple empleando el *software* de impresión 3D *Ultimaker Cura* [Anexo 12], donde se mantuvo constante los siguientes parámetros: recuento de línea de pared, temperatura, velocidad de impresión, velocidad del ventilador y soportes, los cuales el CAP los mantiene constantes 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, solo 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 de la máquina los cuales pueden afectar el tiempo de impresión de las máquinas en el CAP. Al realizar dicho análisis, se encontró que la variable que más describe el modelo es la interacción entre el Área de máquina desperdiciada y Volumen ocupado, con un coeficiente de correlación de 79,45%, sin embargo, al no cumplir con el supuesto de aleatoriedad e independencia, el modelo no permite realizar estimaciones apropiadas, generando una correlación falsa.

Debido a esto, se procedió a realizar una correlación entre volumen ocupado y el tiempo total de impresión [Anexo 12], donde se observó que posee una correlación alta positiva de 80,39%, siguiendo un modelo polinómico y al cumplir con todos los supuestos del ANOVA (Normalidad, igualdad de varianzas y aleatoriedad e independencia), fue posible afirmar que el modelo es confiable y que la variable volumen ocupado describe al modelo en un 64,62%, no obstante, el 35,38% restante se debe a otros factores que no fueron evaluados en este.

Con el objetivo de analizar e identificar las causas que generan la insatisfacción en la prestación del servicio relacionado a la tardanza en la entrega de pedidos, se hizo una lluvia de ideas para registrar la mayor cantidad de causas asociadas al problema mencionado, y así realizar el diagrama de causa y efecto para identificar la causa potencial que genera inconformidades actualmente.

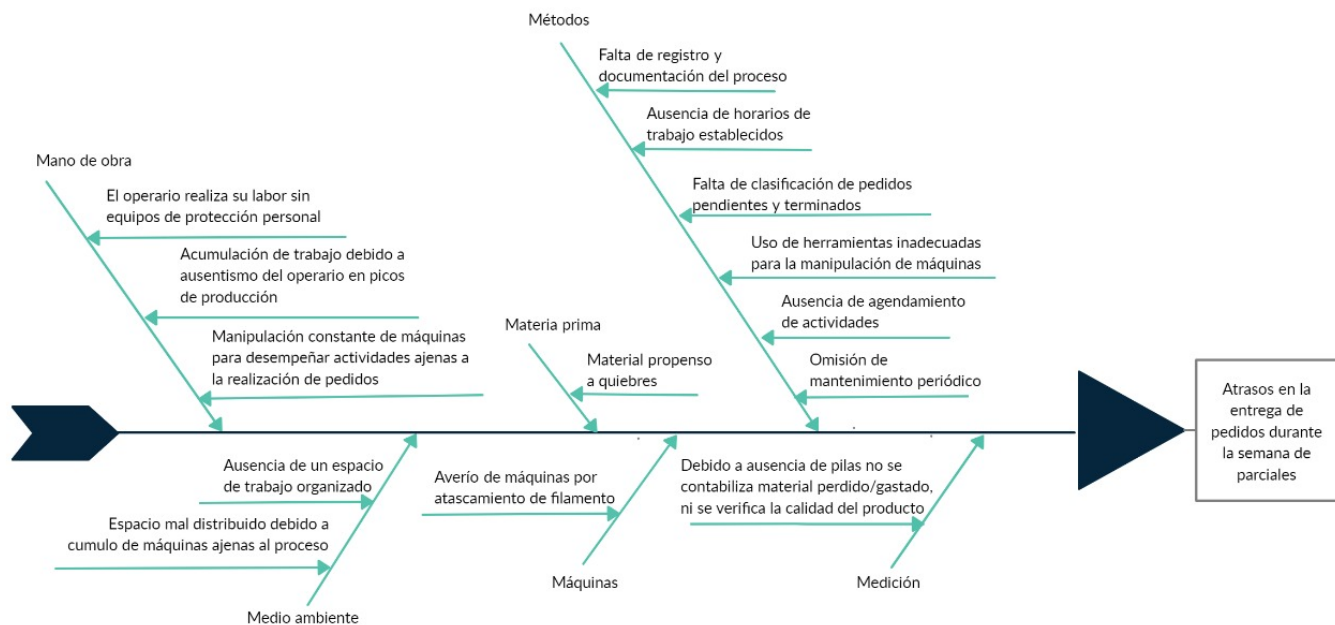


Fig. 8. Diagrama de Causa y Efecto para el servicio de impresión 3D en el CAP.

Al evaluar el proceso actual, existen diversos factores que afectan la ejecución de los pedidos, como son calidad y tiempo de entrega, los cuales generan inconformidad en la prestación del servicio. La Fig. 8. ilustra las causas encontradas y su clasificación en las 6M (Mano de obra, Materia prima, Métodos, Medio ambiente, Medición y Maquinaria) de la siguiente forma:

Mano de obra: Los operarios son uno de los recursos más importantes en el proceso de impresión 3D, ya que reciben las solicitudes de los usuarios, calibran las máquinas, parametrizan las piezas para el correcto funcionamiento de la impresora 3D y

desmontan la impresión cuando ha finalizado. No obstante, se encontraron varios factores que afectan tanto a los operarios como al proyecto final de impresión. Primero se constató que el trabajador no utiliza equipos de protección personal como guantes, con los cuales se protege de quemaduras al momento de realizarle mantenimiento a las máquinas o posibles cortaduras al desmontar las piezas con una espátula. Segundo, se observó que manipulan continuamente las máquinas realizando cambios en las piezas de fábrica con el objetivo de “optimizarla”, no obstante, al realizar estos cambios las máquinas tienden a descalibrarse, tener fallas en su sistema operativo, dañar su funcionamiento y consecuentemente con ello, el pedido que se está fabricando. Finalmente, una de las causas más relevantes encontrada, es la ausencia del operario en el puesto de trabajo durante horarios pico de producción (semana de parciales), lo que genera el atraso de los pedidos.

Materia Prima: El material utilizado para la impresión es un filamento de PLA, el cual es un termoplástico delicado que debe tener un cuidado apropiado para maximizar su vida útil. Para esto, debe permanecer sellado en cajas cerca de un deshumificador el cual retire todo tipo de humedad que pueda afectar el material. No obstante, aunque se cuenta con estos protocolos de cuidado del material, éste es muy propenso a quiebres cuando el rollo de material se va terminando debido a que al final se encuentra más compacto, generando agrietamiento y quiebre en él, lo que causa que la máquina se detenga al no recibir más material.

Medio ambiente: El puesto de trabajo designado para la impresión 3D se encuentra actualmente desorganizado, el operario no cuenta con las herramientas a la mano ya que no existe un espacio designado para éstas, además, en el espacio se encuentran situadas otras máquinas diferentes a las impresoras las cuales son ajenas al proceso e impiden que el operario pueda desplazarse apropiadamente. Las cajas donde se guarda el filamento están situadas en el piso lo que genera que el operario deba agacharse para obtener el material y de vez en cuando tenga interrupciones al desplazarse de una máquina a otra. Finalmente, aunque existen cestas de basura para depositar los desechos de filamento, estas no son utilizadas y los desperdicios son dejados sobre las mesas de trabajo.

Máquinas: Algunas veces las máquinas sufren atascos de filamento en las boquillas debido a que no se dispone de un plan de mantenimiento diario, y el operario para poder limpiarlas usa una herramienta inapropiada.

Medición: No se contabiliza el material perdido o gastado, así como tampoco la calidad del producto dado que no se utiliza la balanza por falta de pilas (se debe realizar una solicitud al área de compras y ser aprobado, por lo que su proceso es demorado, razón por la que no optan hacer uso de dicho mecanismo de medición).

Método: Cabe resaltar que la mayoría de las causas se encuentran en este factor, debido a que el personal del CAP no cuenta con un método establecido para realizar sus actividades, es decir, no detalla un horario o cronograma diario de pedidos a realizar, por lo cual el monitor asiste al CAP para realizar las impresiones cuando tiene disponibilidad. Por otro lado, no se realiza una distinción entre pedidos pendientes y terminados, ni es posible definir un plazo de entrega confiable debido a que no se documenta el proceso, ni se genera trazabilidad de este. Además, al no estandarizar un método de mantenimiento, el operario realiza éste cuando observa que las máquinas presentan fallas o se encuentran atascadas con filamento, lo cual empeora la situación debido a que utiliza herramientas distintas a las que son suministradas por la fábrica (como un taladro para retirar el filamento atascado), lo que a futuro puede generar daños en las boquillas causando un flujo inadecuado de filamento y potenciales riesgos en el operario si éste no realiza la actividad de forma cuidadosa.

Viendo las causas recolectadas en la Fig.7., se determina que la causa principal radica en el método debido a que tiene la mayor cantidad de problemas presentados durante la prestación del servicio, razón por la que se genera atraso en la entrega de pedidos. Por ello, con la finalidad de identificar qué genera dicho problema se utilizó la herramienta de los cinco por qué 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:

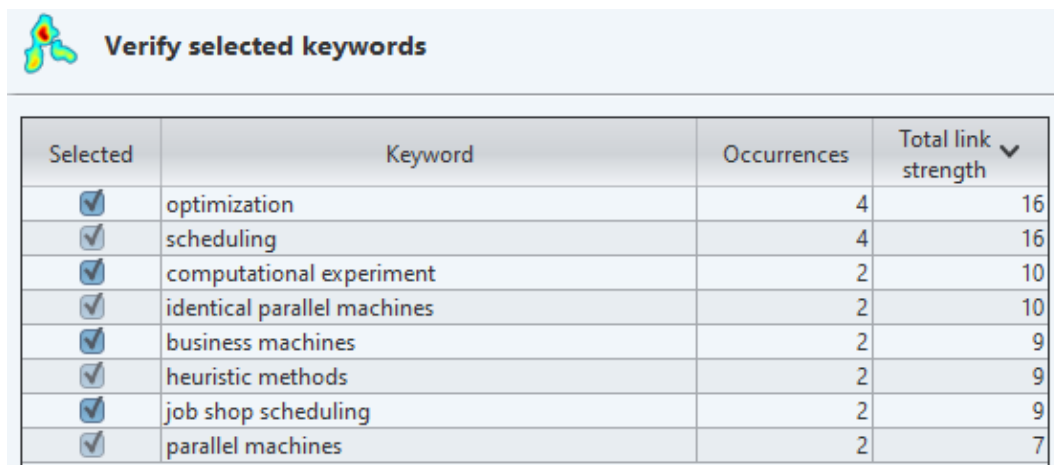
- ¿Por qué hay atrasos en la entrega de pedidos?
Porque existen periodos en los que se acumula el trabajo.
- ¿Por qué existen periodos en los que se acumula el trabajo?
Porque en las fechas de parciales el operario no se encuentra constantemente en el puesto de trabajo durante la jornada laboral.
- ¿Por qué el operario no se encuentra constantemente en el puesto de trabajo?
Porque no existen horarios establecidos
- ¿Por qué no existen horarios establecidos?
Porque no se sabe cuándo se requiere al operario
- ¿Por qué no se sabe cuándo se requiere al operario?

Por qué no existe un agendamiento de actividades a desarrollar durante una jornada laboral establecida, por lo cual se ignora el orden en el que pueden ser realizados los pedidos para que sean ejecutados de manera simultánea.

En conclusión, la causa raíz del problema se encuentra en el método actualmente utilizado por el CAP, lo que genera el atraso en la entrega de pedidos debido a la falta de secuenciación de actividades y un horario de asistencia determinado con el cual el monitor ajuste su tiempo para lograr cumplir con los pedidos y entregarlos a tiempo.

B. Revisión de literatura

Para el desarrollo de la revisión de literatura en un principio se utilizó el método de revisión sistemática de literatura (SLR) para la búsqueda de artículos, *journals* publicados en *ACM Digital Library*, *IEEE EXPLORE*, *EBSCO*, *IOP Science*, *Science Direct* y *SpringerLink*. Estos fueron seleccionados debido a la afinidad con el tema y la calidad aceptable de sus publicaciones. La cadena de búsqueda utilizada fue: ("FDM" OR "3D Printing" OR "Additive Manufacturing" OR "Fused Filament Fabrication" OR "Fused deposition modeling" OR "Filament Freeform Fabrication") AND ("Activity Selection" OR "Optimization") AND ("Scheduling"). Luego se utilizó una cadena de búsqueda mediante el *Software Vos Viewer*, la cual fue: ("Identical Parallel Machine") AND ("Tardiness") OR ("Multimachine") OR ("Batch") AND ("Additive Manufacturing") OR ("Local Search") AND ("Optimization") AND ("scheduling"), cabe resaltar que dicha cadena fue usada en la base de datos *SCOPUS*, para realizar el mapa de búsqueda de literatura que será mostrado posteriormente.



Selected	Keyword	Occurrences	Total link strength
<input checked="" type="checkbox"/>	optimization	4	16
<input checked="" type="checkbox"/>	scheduling	4	16
<input checked="" type="checkbox"/>	computational experiment	2	10
<input checked="" type="checkbox"/>	identical parallel machines	2	10
<input checked="" type="checkbox"/>	business machines	2	9
<input checked="" type="checkbox"/>	heuristic methods	2	9
<input checked="" type="checkbox"/>	job shop scheduling	2	9
<input checked="" type="checkbox"/>	parallel machines	2	7

Fig. 9. Palabras claves para crear el mapa.

Como resultado de la cadena de búsqueda, en la Fig. 9. se observan las palabras claves del problema junto a su número de ocurrencias y la fuerza total de enlace que hay entre estas. Sin embargo, se puede observar que se agregan palabras adicionales de la cadena como lo son *job shop*, *scheduling*, *business machines* y *computational experiment*, esto se debe a que un estudio de revisión sistemática permite conocer otras alternativas que no se habían considerado anteriormente.

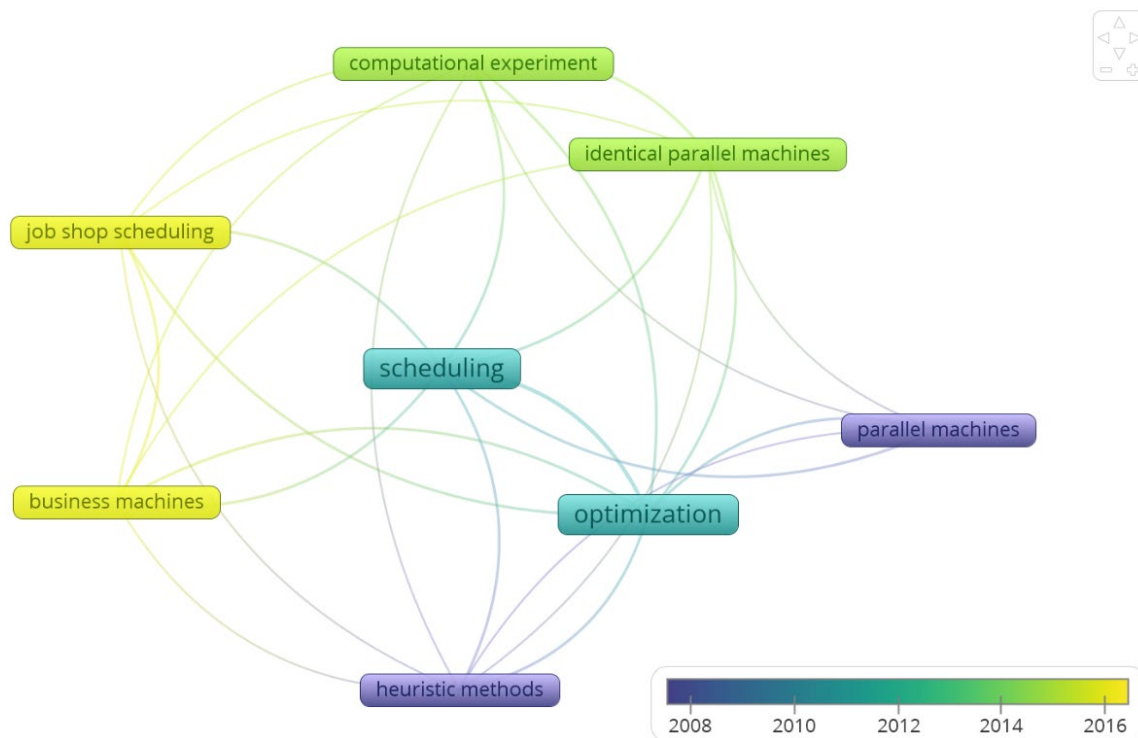


Fig. 100. Visualización de superposición.

En la Fig. 10. es posible visualizar las palabras más repetidas fruto de los documentos encontrados y una línea de tiempo del año en que fueron publicados lo que permite acotarlos de acuerdo con las restricciones que se tengan, por ejemplo, que las publicaciones revisadas sean menores a cinco años del periodo actual. A continuación, se muestra la literatura consultada.

Oh *et al.* analiza un problema de *Nesting and Scheduling* y propone la idea de colocar los objetos (pedidos) en las máquinas de *Additive Manufacturing* (AM) para minimizar el tiempo de producción o maximizar el número de piezas procesadas simultáneamente, evitando que haya colas de trabajos y haciendo que a su vez el tiempo de procesamiento se reduzca. Estos problemas, se pueden clasificar en tres tipos: Anidamiento para AM (NfAM), Programación para AM (SfAM) y *Nesting and Scheduling for AM* (NSfAM) [5], los autores proponen una taxonomía que complementa la clasificación antes mencionada. Esta se encuentra basada en una jerarquía del sistema físico que consta de tres niveles (cantidad de partes a imprimir, nivel de construcción y AM machine), dichos niveles dan como resultado una serie de clases, que de acuerdo con la que se seleccione, va a permitir proporcionar otra perspectiva para ayudar a identificar y organizar los pedidos, así como también identificar los objetivos, las limitaciones, los factores importantes y los supuestos de los problemas, un ejemplo de esto puede ser M/M/iM (*multi part – multi build – identical multi machine*), en donde varios trabajos pueden ser realizados al mismo tiempo en máquinas paralelas idénticas.

Mediante el artículo “*An efficient heuristic for scheduling on identical parallel machines to minimize total tardiness*” propuesto por Vincent *et al.* es posible apreciar un enfoque heurístico codicioso para la disminución de la tardanza, donde en un principio es realizada una lista restringida de trabajos candidatos a partir de una regla de dominancia proporcionada por Azizoglu y Kirca la cual es comúnmente utilizada en algoritmos enumerativos (como *branch and bound*) para restringir la búsqueda y en este caso, para reducir el número de trabajos a programar dentro del algoritmo de recocido simulado, para luego programar los trabajos “rechazados” al final del *schedule*, puesto que estos poseen las fechas de entrega más lejanas [6], sin embargo los autores aclaran que a pesar de que el algoritmo de recocido simulado (SA) de *branch and bound* no pueda garantizar una solución óptima, proporciona mejores resultados que el propuesto por Yalaoui and Chu teniendo en cuenta el tiempo de respuesta y el porcentaje de instancias resueltas de manera óptima.

Posteriormente, Ibrahim Kucukkoc propone en su escrito “*MILP Models to minimize makespan in additive manufacturing machine scheduling problems*”, un algoritmo relacionado al problema de *Bin Packing*, el cual tiene por objetivo lograr empaquetar o juntar artículos dependiendo de un volumen específico en contenedores, con el propósito de utilizar la menor cantidad de éstos. Así pues, se hace uso del *Bin Packing* un problema *NP-Hard*, para determinar la cantidad de artículos a producir en las máquinas dependiendo del volumen de éstas. Debido a que es un problema *NP-Hard*, el algoritmo se maneja mediante la metodología del problema de programación por lotes (*Batch scheduling problems*), con la única diferencia de que para la producción de

manufactura aditiva no se conoce de antemano un tiempo de producción fijo, ya que este varía dependiendo de los parámetros y el volumen total de las piezas incluidas en la máquina. Seguido a esto, Ibrahim presenta un modelo de programación para máquinas similares que trabajan en paralelo, generando un modelo (Pm/ batch(AM)/ Cmax), en donde el objetivo es minimizar el *makespan* aumentando la utilización de las máquinas al imprimir simultáneamente varias piezas en una misma impresora [7].

Para generar una planeación óptima de la producción Freens *et al.* [8] muestran un modelo matemático para aprovechar el espacio de impresión con la mayor cantidad de productos que puedan ser realizados, disminuir la tardanza en los pedidos y así aumentar el rendimiento de una fábrica de impresión 3D que maneja altos volúmenes de producción los cuales son atendidos por múltiples impresoras. Para lo cual, como primera medida busca asignar la cantidad de objetos suficientes a un grupo específico a partir de una extensión del *One-dimensional bin packing problem* y a partir del *3D Packing algorithm* busca determinar la posición óptima de los objetos en la impresora. De esta forma a medida que llegan los pedidos les son asignados unas prioridades según la cercanía a su plazo de entrega y son agrupados verificando que la sumatoria de sus volúmenes individuales les permita ubicarse en el espacio de la impresora, para luego serles proporcionado la posición que deben tener para ser impresos.

Seguido a esto, Francisco Domínguez en su trabajo de grado titulado “Programación de heurísticas para minimizar tiempos de retraso de trabajos con máquinas en paralelo” propone tres heurísticas para resolver el problema NP Hard de minimizar la tardanza en máquinas paralelas, siguiendo la regla de secuenciación de tareas MDD (Modified due dates), con la cual se calcula una holgura teniendo en cuenta las fechas de entrega, el tiempo de procesamiento de cada pedido y el instante de finalización de los trabajos asignados a la máquina menos cargada, teniendo en cuenta que los trabajos siempre van asignados a la máquina menos cargada en cada instante de tiempo [9].

Por otro lado, se han utilizado métodos de búsqueda local para resolver problemas de secuenciación de tareas. La búsqueda local es un método para resolver problemas de optimización cuya finalidad sea la de maximizar o minimizar una función objetivo mediante mejoras iterativas que recorren un espacio de posibles soluciones conocido como vecindad, iniciando con una primera solución (generada aleatoriamente o a partir de una función heurística) y realizando saltos a puntos vecinos hasta que la solución efectuada previamente no pueda ser mejorada [10]. Es importante recalcar, que este método no suele mantener memoria del recorrido realizado, lo que le permite ser ágil, pero puede suponer un problema al caer en bucles, así mismo las soluciones encontradas mediante este no garantizan un óptimo global puesto que se cohibe de recorrer ciertos espacios de la vecindad, pues explorarla de manera exhaustiva podría resultar demasiado costoso computacionalmente en problemas NP (los cuales son atendidos en su mayoría por esta búsqueda), ya que el tamaño del espacio es bastante grande y no puede ser recorrido en tiempo polinomial [11]. Entre los algoritmos de implementación de búsqueda local pueden ser distinguidos: el Algoritmo de Ascensión de Colinas, Recocido o Enfriamiento Simulado y Algoritmo Genético.

La Ascensión de Colinas tiene como propósito encontrar una buena solución al transformar un único elemento de la solución de manera iterativa sin considerar la acción siguiente (cualquier cambio que mejore la función objetivo es aceptado) hasta que no pueda ser encontrada otra respuesta favorable, por lo cual, únicamente puede garantizar un óptimo local, sin embargo, en algunas instancias es preferido dado que puede devolver una respuesta de manera rápida (dependiendo de la solución inicial y la función seleccionada), aun siendo interrumpido [11]. En comparación a este, el Descenso Voraz permite darle valor a un conjunto de variables y evolucionar la solución inicial al seleccionar una variable al azar, cambiar su valor por otro del dominio y evaluar las restricciones sobre la solución actual, tal que no sean presentados conflictos, es decir, restricciones insatisfechas. Para ello, es posible usar criterios propios del problema que permitan escoger el valor y la variable a cambiar, sin embargo, suele ser costoso computacionalmente. Por otra parte, el valor de la variable puede ser modificado en cuanto al dominio, cuando los dominios son pequeños o no existe una relación de orden entre los mismos puede ser seleccionado cualquier valor, cuando los dominios son largos y ordenados los únicos valores que puede tomar son aquellos vecinos que sean adyacentes al valor actual, finalmente en dominios continuos cada variable deberá cambiar proporcionalmente al gradiente de la función asociada a esta [12].

Por otro lado, el Recocido Simulado inspirado en el enfriamiento de metales propone un modo para controlar los reinicios realizados durante el proceso, aumentando su probabilidad de ocurrencia al inicio y disminuyéndola a medida que la solución avanza para “congelarla” en un óptimo local que converja a un óptimo global. De esta forma en un inicio es escogida una variable al azar, se le otorga un valor de manera aleatoria y si proporciona una mejora a la solución actual, es adoptada. No obstante, si esta mejora no se presenta, la solución es adoptada probabilísticamente teniendo en cuenta el parámetro de temperatura (ajustado para decrecer durante el proceso) [12]. Para este algoritmo, deben tenerse en cuenta elementos clave como el parámetro de control, es decir, la temperatura, la calidad de la solución $f(n)$ o energía, la función de aceptación $\mathcal{F}(\Delta f, T)$ que describe la diferencia entre la solución actual y la candidata, junto a la temperatura y la estrategia de enfriamiento que constituye como bajar la temperatura, las iteraciones a realizar y el número de sucesores a atender por cambio de temperatura [11].

Por último, el Algoritmo Genético inspirado en la evolución natural proporciona una cadena de información (cromosoma con genes) que tras generar una población inicial y determinar valores a una función de ajuste, manipula el proceso a partir de operadores de selección para elegir una pareja del grupo de apareamiento, de mutación para evitar la convergencia de las soluciones hacia un óptimo local a partir de una probabilidad (generalmente baja) y de cruce para compartir información (es decir, crear descendencia) determinando un punto de intercambio entre cromosomas y generando una solución. [13]

Al realizar el análisis de literatura mostrado, fue posible identificar métodos de secuenciación de tareas y algoritmos de búsqueda local que podrían ser utilizados para mejorar la prestación del servicio, tal que los usuarios se sientan conformes a la hora de realizar y recibir sus pedidos. En la etapa mejorar, será posible distinguir la metodología seleccionada para atender el problema y los detalles de su implementación.

C. Exploración de ideas y selección de alternativas

Realizada la revisión de literatura y el análisis de causas, se procede a la exploración de ideas que tienen como finalidad cumplir con los requerimientos de los grupos de interés, entre ellos se pueden observar los más importantes para el estudio en cuestión, estos son los profesores y los estudiantes debido a que conforman la mayoría de los usuarios que hacen uso de este servicio. Tal exploración, dio como resultado la creación de alternativas de soluciones factibles a partir de algoritmos y áreas de estudio que brindan métodos y propuestas ligadas al problema principal.

Con base en lo anterior, la aplicación y uso de técnicas de ideación a través de un proceso creativo, permite encontrar diversas soluciones al problema planteado. La técnica seleccionada por el equipo de diseño fue *Reverse Brainstorming*, la cual requiere de: alternativas, preguntas realizadas a los integrantes, conversión de respuestas negativas a positivas y selección de opciones de mejora. Para ello, la pregunta realizada debe buscar empeorar la alternativa que se quiere mejorar, con el objetivo de que los integrantes propongan la mayor cantidad de respuestas negativas y con ello puedan encontrar una alternativa que permita llegar a la solución del problema.

Como primera alternativa, el grupo de diseño seleccionó la secuenciación de actividades y tareas como una posible propuesta para mejorar el servicio ofrecido por el CAP, la pregunta que se propuso fue ¿Cómo se puede tener una mala secuenciación de tareas y de actividades?, a lo que los integrantes respondieron que se debe documentar información incompleta, no separar productos en pendientes y terminados, no generar prioridad a pedidos que deben ser entregados de manera próxima, no determinar plazos de entrega, no documentar el proceso, no considerar la disponibilidad de operarios y maquinaria a la hora de comprometerse en la realización de un pedido. Dichas ideas permitieron encontrar unas posibles propuestas de mejora, la cual constituye desarrollar un algoritmo que permita secuenciar las actividades de manera acorde y establecer un cronograma de asistencia del operario a las instalaciones del CAP para realizar impresiones 3D.

Como segunda alternativa, el grupo seleccionó el desarrollo de 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 lo que los integrantes respondieron: evitar notificar a los usuarios cuando ocurren eventualidades, fijar tiempos de entrega que no se asemejan a la realidad y evitar dar detalles del proceso (¿Cuándo empezó?, ¿Cómo va?, ¿Cuándo terminó?). Por lo cual, al haber obtenido esa retroalimentación, se concluyó que, si el propósito de la propuesta constituía generar trazabilidad a los usuarios sobre sus pedidos, se debería notificar a los mismos cuando sus pedidos estuvieran siendo procesados, si ocurrieron eventualidades en el proceso y si deben ser reacomodadas sus fechas de entrega. Por último, a partir de las ideas antes mencionadas se decidió establecer que la característica más importante para la creación de un prototipo tendría que ser 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 mantenimiento de las máquinas?, siendo las respuestas: no se debe fijar periodos de revisión para las máquinas, ignorar la realización de mantenimiento preventivo y esperar a que las máquinas se dañen para ser arregladas. Dichas ideas permitieron encontrar que para mejorar la atención podrían ser implementadas revisiones periódicas con el fin de evitar posibles daños, así como hacer uso de hojas de mantenimiento para determinar un histórico de periodos en los que se realizaron revisiones de las máquinas. Por último, se seleccionó la opción de realizar un TPM y documentar esto mediante hojas de mantenimiento.

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

del espacio. Por último, se selecciona de todas las ideas antes mencionadas el hacer uso de herramientas Lean como las 5s para mejorar la organización en el espacio de trabajo.

Como quinta alternativa, se planteó la pregunta ¿Cómo no se debe contratar los operarios? haciendo referencia a la alternativa contratación de operarios, a lo que los integrantes respondieron: realizar contrato verbal o físico por horas sin saber qué es lo que se requiere, ignorar la cantidad de tiempo que debe ser utilizado el recurso humano para la realización de pedidos y desconocer las actividades que debe desempeñar el personal contratado. Mediante esto, se propone realizar una contratación adecuada conociendo la disponibilidad de tiempo del operario para que no haya inconvenientes en la prestación del servicio. Por último, se llegó a la conclusión de realizar la contratación de operarios teniendo en cuenta la demanda que debe de ser atendida.

Para escoger la mejor alternativa, se hizo uso del análisis jerárquico AHP [Anexo 14], que selecciona la mejor alternativa bajo una serie de criterios. Para el presente proyecto, se hizo uso de cinco criterios los cuales son: costo, tiempo, facilidad, disponibilidad y confiabilidad. De manera que al examinar el costo de la propuesta a desempeñar, esta no tenga un valor bastante elevado; el tiempo de ejecución de la misma sea corto, puesto que debe ser desempeñada durante un semestre y la rapidez en su implementación constituye un factor bastante importante; la facilidad se remonta a que al ser desempeñada nuevamente por los operarios sea fácil 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. Así pues, al haber examinado dichos criterios y hacer uso de la metodología la mejor alternativa de solución para reducir los atrasos en la entrega de pedidos es la de secuenciación de actividades que permita organizar de manera acorde 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 mediante una metodología para solucionar el problema de programación de los pedidos de impresión 3D en el propósito de reducir la tardanza en la entrega de pedidos.

Objetivos específicos:

- Establecer las restricciones del problema para realizar una adecuada secuenciación de actividades.
- Identificar las variables que inciden en el proceso para diseñar la metodología que pueda abordar el problema.
- Diseñar metodología de solución para la planificación de pedidos, asignación de tareas.
- Validar el impacto de la propuesta mediante una prueba piloto.

E. Plan de trabajo (PdT)

Para establecer el plan de trabajo de las actividades a desempeñar, en la TABLA IX, 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 Project de este plan de trabajo.

TABLA IX
PLAN DE TRABAJO

Objetivo	Área HSE	Herramientas de Ingeniería Industrial	Actividad	Entregable (alcance)	Fecha entrega
Establecer las restricciones del problema para realizar una adecuada secuenciación de actividades.	Investigación y análisis de operaciones.	Investigación de Operaciones.	Buscar metodologías que se ajusten a la secuenciación de actividades, teniendo en cuenta las restricciones del CAP para la prestación del servicio.	Entrega de literatura investigada.	22/02/2021
Determinar la metodología a desempeñar para abordar el problema.	Investigación y análisis de operaciones.	Investigación de Operaciones.	Seleccionar metodologías más apropiadas.	Entrega de metodologías seleccionadas.	26/02/2021

Diseñar algoritmo para la planificación de pedidos, asignación de tarea.	Gestión de ingeniería y operaciones.	Secuenciación de la producción.	Adaptar las metodologías seleccionadas mediante el código de programación.	Aplicativo por consola desarrollado en <i>Visual Basic for Applications</i> .	26/03/2021
	Investigación y análisis de operaciones.	Programación	Realizar manuales para que el personal del CAP pueda conocer el proceso a llevar a cabo.	Manual de usuario, e instalación para el personal del CAP.	02/04/2021
Validar el impacto de la propuesta mediante una prueba piloto.	Diseño y medición del trabajo y Gestión de ingeniería.	Análisis de trabajo y Enfoque en el cliente.	Medir la tardanza en la entrega de proyectos de impresión y Obtener las perspectivas de los usuarios como resultado de la prueba piloto	Indicador de tardanza medido y Encuestas de satisfacción a los usuarios del servicio.	30/04/2021

V. MEJORAR

A. Desarrollo del diseño de la solución

Con el objetivo de cumplir el plazo establecido de los pedidos a los usuarios y aumentar la satisfacción del cliente mediante el servicio prestado, se realizó una metodología adaptada del problema de secuenciación de máquinas paralelas idénticas conocida como la triplete de secuenciación $P_m | | \sum T$, esta permite disminuir la tardanza a través de la asignación de tareas, otorgando una secuenciación a realizar y determinar en qué máquina se debe procesar.

Ahora bien, el problema $P_m | | \sum T$ para dos máquinas constituye un problema *NP-Hard*, lo que significa que el tiempo de respuesta no es posible obtenerlo en un tiempo polinomial por lo que su resultado varía dependiendo de la cantidad de variables y decisiones a tomar, motivo por lo que se decidió hacer uso de una heurística basada en reglas de prioridad para secuenciar actividades acorde a la problemática encontrada. Para las heurísticas se evaluaron tres reglas de secuenciación, estas son: FIFO, EDD y MDD modificada, donde sus soluciones encontradas fueron comparadas frente a un modelo matemático (*MIP*) con el objetivo de verificar cuál de las tres reglas se acerca más al valor óptimo. La razón del porqué se seleccionó la regla *FIFO* fue por la forma en que el CAP realiza sus actividades actualmente, por otro lado, se seleccionó la regla *EDD* como mejor alternativa comparativa puesto que tiene como finalidad reducir la tardanza seleccionando primero los trabajos con menor fecha de entrega (*due date*) y asignándolos en las máquinas menos cargadas. Cabe recalcar que el modelo matemático solo fue empleado para comparar la efectividad de las heurísticas, no fue entregado al CAP puesto que requiere descargar el programa *AMPL* en el computador y adquirir una licencia para su implementación.

La metodología propuesta se basa en la regla de secuenciación MDD modificada tomada como ejemplo de la primer heurística desarrollada por Francisco Domínguez, donde se calcula la holgura de los trabajos no asignados la cual se puede interpretar como el valor máximo entre la fecha de entrega (d_i) y tiempo de la máquina menos cargada (t) más el tiempo de procesamiento (π_i) ($\max(d_i; t+\pi_i)$), luego se ordenan los trabajos de menor a mayor holgura con el fin de asignar dichos trabajos a la máquina menos cargada, por ultimo calcular el tiempo de finalización del trabajo (T_i) y se actualiza el tiempo de finalización de la máquina menos cargada (t), esto puede observarse en el diagrama de flujo presentado en la página 26 de la propuesta realizada por F. Domínguez [9]. La heurística fue realizada mediante el código de programación *Visual Basic for Application (VBA)* de Excel dada la comodidad y facilidad de uso al momento de interactuar con la herramienta, el software debe ser una versión superior a la de 2003 para visualizar la información suministrada por el equipo de diseño. El archivo de Excel se encuentra en un formato de libro binario de Excel el cual permite leer, escribir y desarrollar cálculos más rápido cuando se cuenta con hojas de cálculo muy grandes, además de ser compatible con los códigos de macros en *VBA* [Anexo 16]. Las dos heurísticas adicionales (FIFO y EDD) no son programadas mediante *VBA*, pues su uso solo es para fines comparativos a la regla de prioridad MDD modificada y al valor óptimo.

Para las especificaciones del diseño de las metodologías se asumió un área de trabajo igual para ambas máquinas, 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 del proyecto, (es decir, la 3D20), al igual que se designó el problema como máquinas paralelas idénticas ya que, aunque son modelos diferentes (3D20 Y 3D40), su velocidad de impresión es la misma y el programa utilizado para convertir el formato STL a código G es el mismo para ambas máquinas. Por otro lado, el tiempo de procesamiento al ser determinado por las características que posee la boquilla, será establecido de manera independiente a las máquinas puesto que su longitud de diámetro

y velocidad de impresión son las mismas, específicamente 0.4 mm y 120 mm/s [14]. Además se plantearon las siguientes restricciones:

- Los trabajos deben estar en código G al momento de utilizar la metodología para suministrar información dada por el programa *Ultimaker Cura*.
- Los trabajos a programar deben ser recibidos en un periodo inicial para ser ejecutados de manera secuencial, sin interrupciones y sin precedencias para su procesamiento.
- No se manejará un enfoque reactivo, razón por la que la metodología debe ser utilizada diariamente con la cantidad de pedidos que se encuentran parametrizados en código G.
- Los trabajos deben poseer dimensiones menores a las del espacio de impresión.
- Serán secuenciados trabajos con tiempo de procesamiento menor o igual a cinco horas.
- Para el diseño de la metodología se utilizarán las impresoras 3D20 y 3D40.

La metodología utilizada para determinar una solución óptima a la asignación de trabajos para secuenciar en máquinas paralelas idénticas y reducir su tardanza total se basó en desarrollar un modelo matemático. Por ello, para su diseño fue considerado el modelo de *Kongsri et al* [15] con ligeras modificaciones presentadas a continuación:

Conjuntos

N Conjunto de trabajos a realizar. $j \in N$
 M Conjunto de máquinas. $i \in M$

Parámetros

P_{ij} Tiempo de procesamiento del trabajo j en la máquina i .
 d_j Plazo de entrega del trabajo j .
 V Valor muy grande.

Variables de decisión

X_{ijk} $\begin{cases} 1 & \text{si el trabajo } k \text{ es asignado después} \\ & \text{del trabajo } j \text{ en la máquina } i \\ 0 & \text{de lo contrario.} \end{cases}$
 c_j Tiempo de finalización del trabajo j .
 $E1_j$ Tiempo adicional después del d_j .
 $E2_j$ Tiempo de sobra antes del d_j .

Función objetivo

Minimizar

$$\sum_{j \in N} E1_j \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in No; j \neq k} X_{ijk} = 1 \quad \forall k \in N. \quad (2)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{k \in No; j \neq k} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{k \in No; j \neq k} X_{ijk} - \sum_{h \in No; j \neq h} X_{ihj} = 0 \quad \forall i \in M, \forall j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{k \in N} X_{i0k} \leq 1 \quad \forall i \in M \quad (5)$$

$$C_k = P_{ik+c_j} - V(1 - X_{ijk}) \quad \forall i \in M, j \in N_0, \quad k \in N: j \neq k \quad (6)$$

$$C_0 = 0 \quad (7)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in M, j \in N_0, k \in N_0: j \neq k \quad (8)$$

$$c_j \geq 0 \quad \forall j \in N \quad (9)$$

$$C_j - D_j = E1_j - E2_j \quad \forall j \in N \quad (10)$$

$$E1_j, E2_j \geq 0 \quad \forall j \in N \quad (11)$$

La función objetivo (1) es minimizar la tardanza total. Mediante la restricción (2) se obliga a que cada trabajo tenga exactamente un trabajo anterior. Posteriormente, la restricción (3) indica que cada trabajo tiene exactamente un trabajo posterior. La restricción (4) representa la restricción de equilibrio de flujo de cada trabajo en cada máquina. Además, la restricción (5) especifica el primer trabajo en cada máquina. La restricción (6) asegura que el tiempo de finalización del trabajo j sea igual al tiempo de finalización del trabajo anterior y el tiempo de procesamiento del trabajo j en cada máquina. Posteriormente la restricción (7) establece el tiempo de finalización del trabajo ficticio en 0. Las restricciones (9) y (11) definen el tipo de variables de decisión y, por último, la restricción (10) calcula el valor de tardanza usando la variable $E1_j$ (tardanza) y $E2_j$ (adelanto).

De esta forma, para verificar que el modelo matemático cumplía con las restricciones, se probó con unos datos de ejemplo mediante el lenguaje computacional AMPL, el cual no presentó error alguno y por ende se utilizará como base para validar si las heurísticas logran aproximarse al óptimo. Posteriormente, se verificó el cumplimiento de las restricciones planteadas en la etapa definir del literal C (Requerimientos), donde se observa que los requisitos y restricciones de las partes interesadas se encuentran especificados en variables de tiempo y satisfacción, los cuales fueron considerados en el desarrollo la metodología. Después, se procedió a verificar las restricciones de la metodología propuesta, estas son: capacidad de las máquinas y dimensiones de las máquinas 3D20 y 3D40. Luego, mediante una prueba piloto se evaluó si la metodología propuesta es la más adecuada en relación a la proximidad de la solución óptima y si permite reducir la tardanza de los pedidos a entregar.

Por último, se realizó un esquema del orden en que se llevó a cabo el proyecto de diseño, teniendo en cuenta el sistema de operación actual en la prestación del servicio. Este esquema fue dividido en cuatro fases (fase I – usuarios del CAP, fase II – personal del CAP, fase III – entrega del pedido, fase IV – validación de los KPI'S) según los procesos que debe realizar el usuario y el personal del CAP para hacer uso de este servicio y recibir su pedido en el tiempo establecido, como se evidencia en la fig. 11.

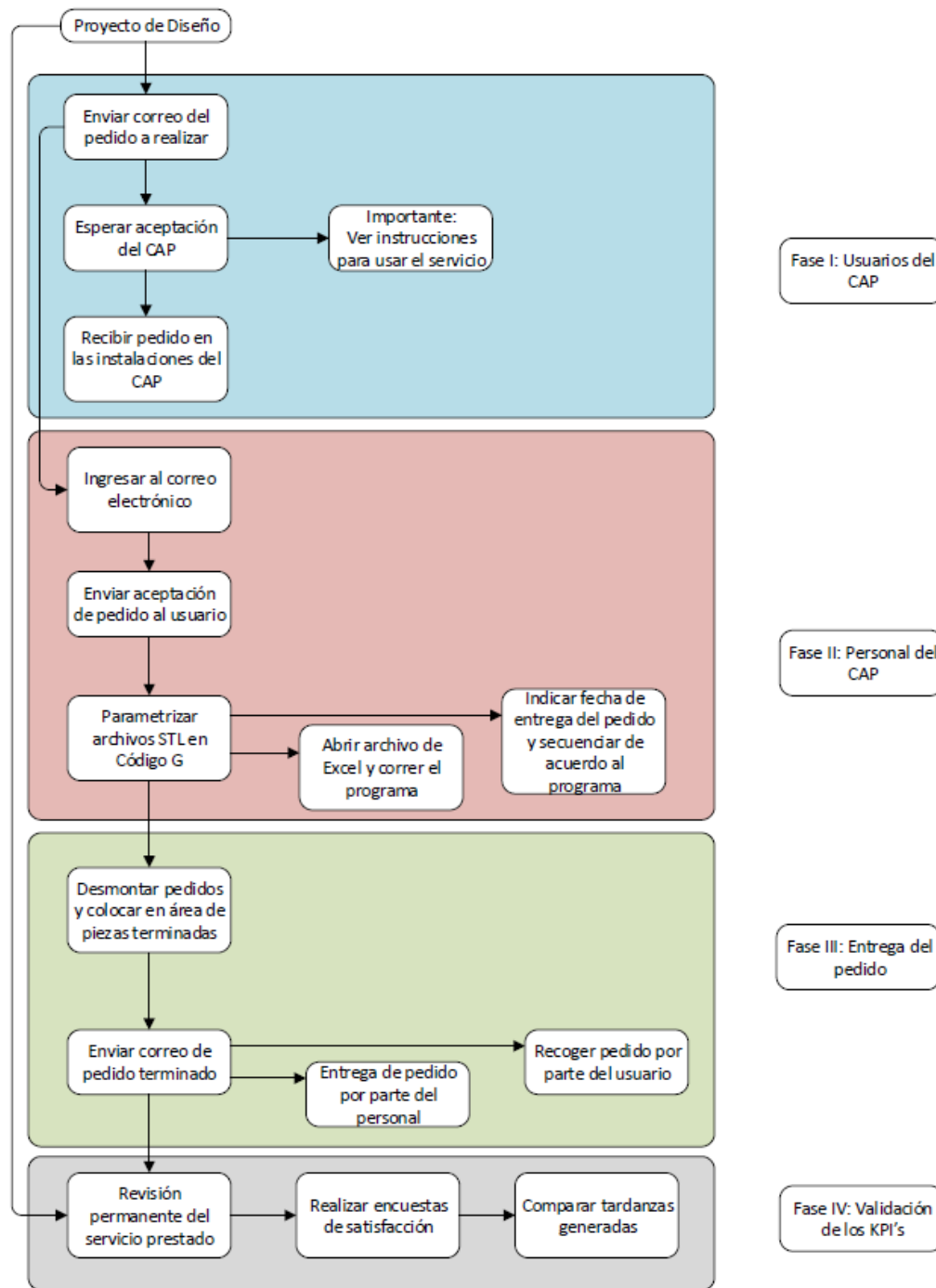


Fig. 111. Esquema de la metodología

B. Validación del diseño propuesto

Con el objetivo de validar si la metodología propuesta funciona y logra cumplir la meta establecida para cada KPI (tardanza y satisfacción del cliente), en un inicio se estimó realizar una prueba piloto en el CAP desde el 13 de abril de 2021 hasta el 30 de abril de 2021 con la finalidad de obtener datos reales en las dos semanas de segundos parciales del primer periodo académico, no obstante por las circunstancias atípicas ocasionadas por la pandemia la prueba piloto solo pudo ser realizada desde el 13 de abril de 2021 al 23 de abril de 2021, cabe resaltar que los 49 datos recolectados en la prueba piloto fueron dados por el personal del CAP debido a que los estudiantes no ingresaron a las instalaciones por las medidas de seguridad y salud que estableció la universidad.

Los datos recolectados en la prueba piloto fueron probados en el modelo matemático, el cual generó una solución óptima en minutos de 982 y en las tres heurísticas propuestas, dando como resultado unas tardanzas en minutos de: 6931, 4583 y 983 utilizando las heurísticas FIFO, EDD y MDD modificada respectivamente. En la Fig. 12. se presenta con mayor detalle los resultados de las tardanzas encontradas mediante las heurísticas y el valor óptimo.

Días de recolección	Tardanza											
	FIFO			EDD			MDD			AMPL		
	Minutos	Horas	Días	Minutos	Horas	Días	Minutos	Horas	Días	Minutos	Horas	Días
1	381,00	6,35	0,26	300,00	5,00	0,21	154,00	2,57	0,11	154,00	2,57	0,11
2	762,00	12,70	0,53	300,00	5,00	0,21	154,00	2,57	0,11	154,00	2,57	0,11
3	796,00	13,27	0,55	480,00	8,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	535,00	8,92	0,37	454,00	7,57	0,32	308,00	5,13	0,21	308,00	5,13	0,21
5	737,00	12,28	0,51	619,00	10,32	0,43	85,00	1,42	0,06	85,00	1,42	0,06
6	674,00	11,23	0,47	521,00	8,68	0,36	281,00	4,68	0,20	281,00	4,68	0,20
7	1138,00	18,97	0,79	947,00	15,78	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1908,00	31,80	1,33	962,00	16,03	0,67	1,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	6931,00	115,52	4,81	4583,00	76,38	3,18	983,00	16,38	0,68	982,00	16,37	0,68

Fig. 122. Tardanza total de las heurísticas y modelo matemático

Posteriormente, se realizó un diagrama de líneas en el que se puede mostrar la información antes mencionada en la Fig. 12. y evidencia que la solución óptima fue de 16,37 horas (16 horas y 22 minutos) y la metodología propuesta dio como resultado una solución de 16,38 horas (16 horas y 23 minutos). Es por ello, que el algoritmo basado en la regla MDD modificada es el que presenta una tardanza menor frente a las demás heurísticas y una asignación adecuada de trabajos por día, aproximándose en mayor medida al valor óptimo. Por otra parte, se puede concluir que al ser un valor menor a la meta planteada en un principio donde los pedidos regulares tienen una tardanza máxima de cuatro días, se logró cumplir la meta con éxito y reducirla aún más. Los resultados de este análisis están sustentados en el [Anexo 17].

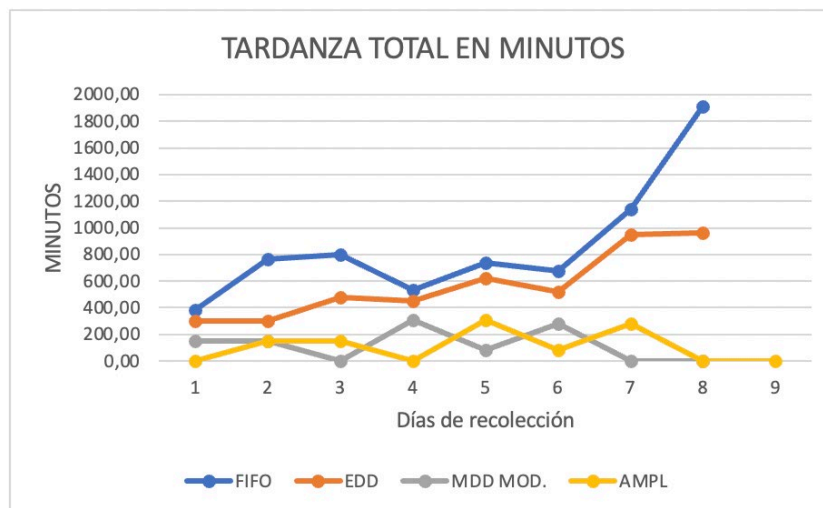


Fig. 133. Tardanza total en minutos

En el propósito de conocer la proximidad de las heurísticas frente al valor óptimo, se hace uso de la desviación para ver la dispersión de los datos, de esta forma, entre mayor desviación se obtenga, mayor es el sesgo de los datos frente al valor óptimo. Como se observa en la Fig. 14.

Días de recolección	Desviación								
	FIFO			EDD			MDD		
	Minutos	Horas	Días	Minutos	Horas	Días	Minutos	Horas	Días
1	147,40%	2,46%	0,10%	94,81%	1,58%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%
2	394,81%	6,58%	0,27%	94,81%	1,58%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%
3									
4	73,70%	1,23%	0,05%	47,40%	0,79%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%
5	767,06%	12,78%	0,53%	628,24%	10,47%	0,44%	0,00%	0,00%	0,00%
6	139,86%	2,33%	0,10%	85,41%	1,42%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%
7									
8									
Total	1522,83%	25,38%	1,06%	950,66%	15,84%	0,66%	0,00%	0,00%	0,00%

Fig. 144. Porcentaje de desviación frente al óptimo

Seguido a esto, se realizó un diagrama de líneas en el que se puede evidenciar la información antes mencionada en la Fig. 14. y permite observar el porcentaje de dispersión de los datos recolectados de las tres heurísticas frente al valor óptimo como se muestra en la Fig. 15. De esta forma las reglas de prioridad FIFO, EDD y MDD modificada, dan como resultado aproximado un porcentaje de: 1522, 83%, 950,66% y 0,00% respectivamente. Es por ello, que el algoritmo basado en la regla MDD modificada es el que representa una dispersión casi nula en comparación al óptimo, esto quiere decir que su resultado se aproxima en mayor medida al óptimo.

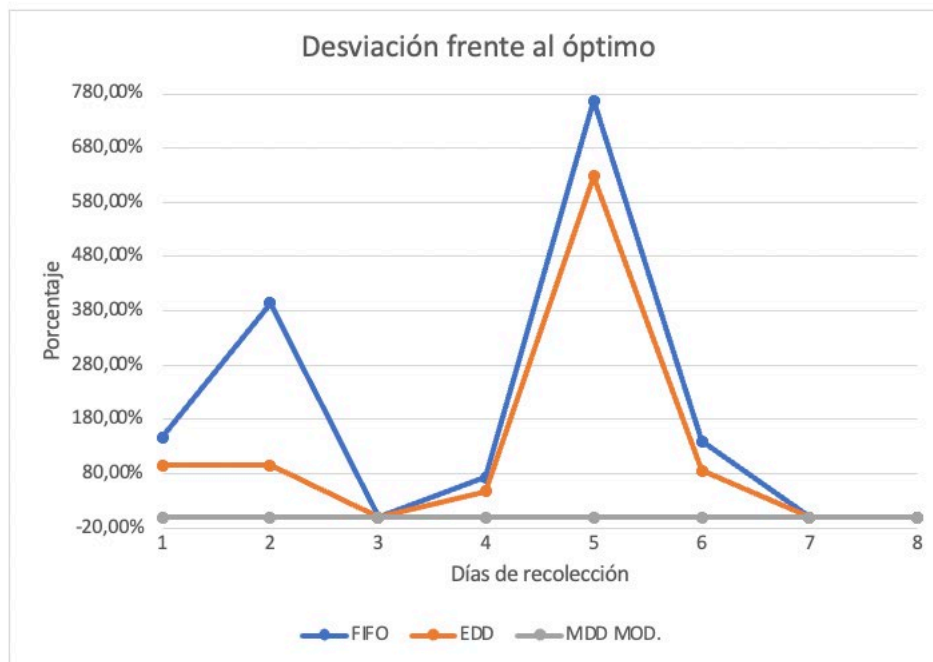


Fig. 155. Desviación frente al óptimo

Posteriormente, se realizó una encuesta al coordinador del CAP y la monitora para validar la satisfacción de la metodología implementada y a su vez conocer si la solución propuesta es funcional. De esta forma se observó que el método propuesto por el grupo de diseño fue útil para el desarrollo de la asignación de tareas. Resultado de ello, permitió a la monitora adecuar sus horarios dependiendo de los proyectos de impresión que debía realizar, asimismo considerar la propuesta como una buena opción de automatización para el CAP. Por último, se mencionó un punto de mejora, el cual se basa en almacenar la información digitada en el archivo de Excel suministrado por el equipo para tener registros sobre los pedidos realizados por los usuarios en los semestre académicos. La encuesta se puede observar en el [Anexo 18].

Ahora bien, a continuación se presenta un análisis de % de optimalidad GAP de las diferentes heurísticas planteadas (FIFO, EDD y MDD Modificada), se hará uso de los datos recolectados en la prueba piloto para determinar cómo se comporta la

optimalidad en una semana de parciales para cuatro escenarios, donde estos representarán el número de pedidos que podría llegar diariamente y por último, se presenta el tiempo de computación de modelo matemático y la heurística propuesta.

El % de optimalidad gap se considera como diferencia porcentual entre la mejor solución obtenida y la mejor cota encontrada hasta el momento o un valor límite del modelo. Su expresión para el cálculo del gap para minimización viene dada por $GAP = (MS - MC / MC) * 100$. Donde MS es la mejor solución obtenida y MC es la mejor cota encontrada hasta el momento.

Días de recolección	GAP (% de optimalidad)		
	FIFO	EDD	MDD
1	147,40%	94,81%	0,00%
2	394,81%	94,81%	0,00%
3			
4	73,70%	47,40%	0,00%
5	767,06%	628,24%	0,00%
6	139,86%	85,41%	0,00%
7			
8			

Fig. 166. Gap (% de optimalidad)

Cuanto más cercano sea el valor del GAP a cero, mejor es la solución encontrada. Si el GAP es cero, se tiene la seguridad que se ha alcanzado el óptimo. Ahora bien, como evidencia la Fig. 16. la heurística MDD Modificada llega a un valor de cero por lo que se infiere que se tiene la seguridad de haber alcanzado el óptimo.

Nota: los días de recolección 3,7 y 8 no se pudieron realizar puesto que el valor exacto arrojado por AMPL es cero y no permite realizar dicho cálculo. Dicho análisis de % de optimalidad gap se puede realizar en el caso de que AMPL sea óptimo.

Escenarios	Regla de prioridad (tiempo de computación seg)			
	MDD Modific	AMPL	Diferencia	Porcentaje
5 pedidos	6	2	-4	66,67%
7 pedidos	9	4	-5	55,56%
10 pedidos	14	138	124	885,71%
13 pedidos	21	5415	5394	25685,71%

Fig. 177. Tiempo de computación en segundos

Como se puede observar en la Fig. 17., los escenarios propuestos fueron para 5,7,10 y 13 pedidos, donde se puede apreciar el tiempo de computación otorgado por la heurística propuesta y el lenguaje computacional AMPL, se puede observar que a medida que la cantidad de pedidos aumenta, el tiempo computacional también lo hará, no obstante, como se puede apreciar, a partir de 13 pedidos la diferencia es notable por lo que la propuesta diseñada otorga una buena solución en poco tiempo.

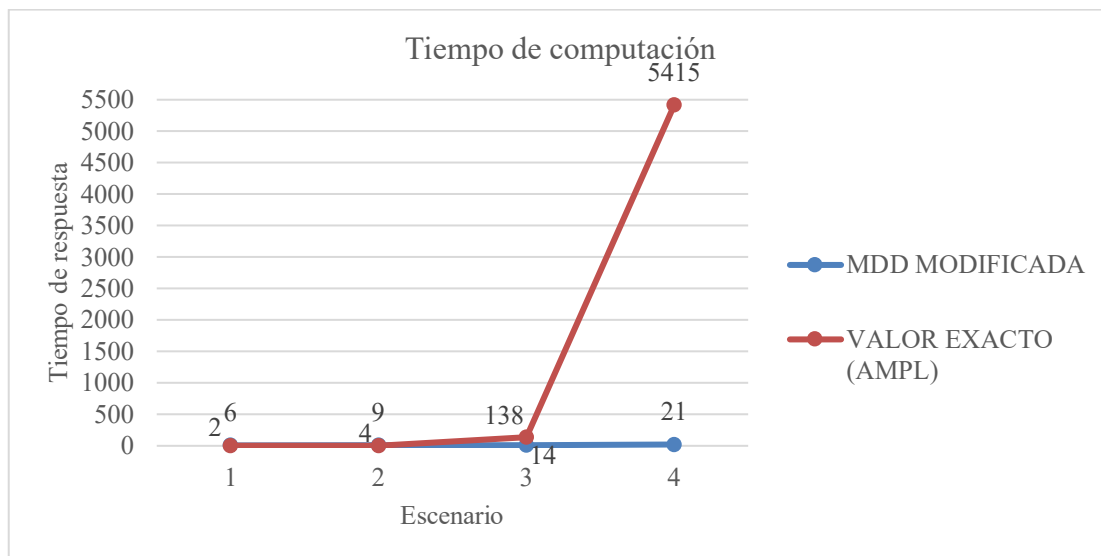


Fig. 188. Tiempo de computación en segundos (gráfica)

La anterior figura, permite visualizar el tiempo computacional a medida que aumentan los pedidos de acuerdo al escenario que se este realizando, donde el escenario 1,2,3 y 4 hacen referencia a 5,7,10 y 13 pedidos respectivamente. Donde se puede observar que el tiempo de respuesta empieza aumentar en gran medida es a partir del escenario 3.

Por otra parte, se planteó una encuesta [Anexo 19] para los usuarios del CAP con el objetivo de validar la satisfacción del cliente al recibir los pedidos de una forma más organizada, no obstante, por cuestiones de la pandemia durante la prueba piloto los estudiantes no asistieron a la instalación ni imprimieron pedidos para sus parciales. De esta forma, el indicador de la satisfacción del cliente no pudo ser validada, sin embargo, es posible inferir que esta aumenta, validando su cumplimiento a través de la metodología entregada al CAP puesto que soluciona una de las mayores inconformidades de los usuarios que es la de los atrasos frente a las fechas estipuladas de entrega de los pedidos.

Por último, dado que no fue posible realizar las encuestas, estas fueron entregadas al personal del CAP para que en circunstancias normales una vez concluya la pandemia y se implemente la metodología utilizada, puedan ser realizadas y validar que efectivamente la satisfacción del cliente aumenta al recibir sus pedidos en el tiempo pactado por el personal. Se recomienda al Centro de Automatización de Procesos recolectar 88 encuestas ya que estadísticamente es una muestra apropiada para validar la metodología en relación a los usuarios de las diferentes carreras académicas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali que hacen uso de este servicio.

VI. CONTROLAR

A. Medición de los impactos.

La medición del impacto del diseño del proyecto permite conocer cómo se encuentra el estudio de acuerdo a ciertos indicadores o criterios que permita tomar la decisión por parte del CAP sobre aplicar o no la metodología propuesta, es por ello que mediante los impactos presentados a continuación, se busca sustentar la razón del porqué se debe implementar la propuesta por el grupo de diseño.

Por lo tanto, se presenta un análisis ergonómico en el que a través de la metodología propuesta por el equipo de diseño al CAP, es posible generar una nueva forma de desarrollar el trabajo y conocer la permanencia del monitor dentro de las instalaciones, dando como resultado una buena distribución del tiempo entre lo académico y laboral. Motivo por el cual se crea un beneficio para el personal al tener una mayor facilidad en realizar sus actividades en el lugar de trabajo, puesto que se conoce de antemano las secuencias de pedidos a realizar, en qué máquina y la tardanza generada para cumplir con los pedidos de los usuarios.

La propuesta diseñada por el equipo no posee un impacto ambiental puesto que esta no tiene como finalidad reducir desperdicios de filamento o reutilizarlos, sino secuenciar actividades a través de un software denominado Microsoft Excel. No

obstante, se puso como recomendación estudiar el desperdicio del material en las impresoras para reutilizarlos y hacer un mejor uso de este.

Al optimizar el trabajo de la monitora, se podría reducir la carga laboral de ella, mejorando su eficiencia, Ahora bien, actualmente no se tiene un control de costos (a excepción de la cantidad de filamento que requiere por periodo académico). El cálculo del impacto financiero no se puede realizar puesto que no se tiene un registro de los costos del proceso llevado a cabo en las instalaciones como cuanta energía consume cada maquina de impresión, del filamento que se compra, cuanto se desperdicia, que acabados luego de la pieza se tiene que realizar, entre otras variables que son necesarias para hacer un estudio financiero y permitir determinar cuánto podría costar una pieza de impresión (hacer un costo / beneficio o un vpn para determinar si el proyecto es factible o no).

Para concluir, el impacto económico no se analiza puesto que la unidad del CAP inscrita a la Universidad presta un servicio de impresión 3D a los usuarios de la comunidad sin costo, razón por la cual, esta no se enfoca en la generación de ingresos por lo que calcular un VPN o Razón Beneficio/Costo no es pertinente ni viable. Sin embargo, la propuesta ofrecida por el grupo de diseño va a traer beneficios de satisfacción del usuario mediante el cumplimiento en la entrega de los pedidos a los usuarios a través de la reducción de la tardanza mediante la heurística brindada en Excel.

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

En un principio, se realizó una evaluación del estado actual de los procesos que el CAP lleva a cabo para la prestación del servicio de impresión 3D, donde fue posible evidenciar que ellos no manejaban un proceso estandarizado, razón por la que la metodología propuesta por el equipo de diseño permite a través del algoritmo, secuenciar los pedidos de una buena forma al reducir la tardanza e indicarle al personal del CAP en qué máquina debe realizar cada pedido.

Consecuencia de este proyecto y como herramienta de estandarización de las nuevas formas de trabajo, se crearon los manuales de usuario e instalación que se evidencian en el [Anexo 20 - 21], los cuales fueron entregados al CAP para estandarizar el proceso llevado a cabo por el personal que presta el servicio de impresión 3D, permitiendo tener conocimiento de la herramienta propuesta (código en Excel), su funcionamiento e instalación en las computadoras. Con ello, se prevé que se dará una buena prestación del servicio, que por ende redunde en aumento de la satisfacción de los usuarios al reducir la tardanza de los pedidos a entregar. Estos manuales deben encontrarse en un lugar visible y de fácil acceso al personal, con el objetivo de consultar cualquier inquietud respecto al proceso.

C. Conclusiones.

Mediante el desarrollo del proyecto de diseño se encontró que el servicio de impresión 3D prestado por el Centro de Automatización de Procesos presenta problemas en el método debido a la acumulación de trabajo por falta de horarios establecidos, agendamiento de pedidos, ausencia del personal en las instalaciones y poca documentación, generando así atrasos en los pedidos e insatisfacción de los usuarios, dicha problemática se presenta con mayor frecuencia en la semana de parciales con los pedidos regulares los cuales tienen un tiempo de procesamiento de cero a cinco horas, Razón por la que se diseñó una metodología para solucionar el problema del agendamiento de los pedidos en el propósito de reducir la tardanza en la entrega de solicitudes, siendo este el objetivo general del presente proyecto.

De esta forma, de un total de 258 pedidos atendidos durante el año 2019 a 2020-1, el 70,54% corresponde a la familia de productos regulares, donde en un periodo de parciales se realizaron máximo 49 encargos. Ahora bien, a través de la información anteriormente mencionada, se realizó un modelo de simulación en el programa Simio ® con el fin de determinar la tardanza total del sistema la cual fue de seis días. Por esa razón, la metodología propuesta mediante la regla de prioridad MDD modificada permite obtener una secuenciación de pedidos que generó una tardanza de 16 horas y 23 minutos, lo que significa que la meta se logró cumplir y reducir en un 82,93% respecto a la meta proyectada.

Por motivos de la contingencia no fue posible realizar una encuesta de satisfacción a los usuarios para validar el cumplimiento de uno de los KPI's, por lo que se dejó estructurado y entregado al CAP para que en condiciones normales una vez finalice la pandemia y se retomen las actividades académicas, se pueda visualizar el mejoramiento en la satisfacción del cliente a través de la propuesta. No obstante, el aumento de este indicador se puede inferir dado que en la etapa Medir se realizó una encuesta donde se observó que una de las quejas de los usuarios es producida por la tardanza en la entrega de pedidos, lo cual se ve resuelto en el código de agendamiento de tareas entregado al CAP.

D. Recomendaciones.

A través del desarrollo del proyecto se logró determinar que la falta de documentación de los pedidos realizados por los usuarios fue uno de los mayores inconvenientes presentados al momento de elaborar el proyecto puesto que para determinar el estado actual del CAP y lograr encontrar los puntos de mejora fue necesario acudir a encuestas, pruebas pilotos y simulaciones, motivo por lo que se recomienda documentar toda la información pertinente al servicio puesto que es importante tener control y seguimientos periódicos de los registros.

Durante la etapa Medir se realizó un estudio de correlación múltiple donde se encontró una correlación alta positiva de 80,39% entre el volumen ocupado y el tiempo total de impresión, donde estas variables describen al modelo en un 64,62%, por lo que se recomienda acomodar varios pedidos de impresión en la misma cama, razón por la que se es más eficiente y eficaz al momento de la realización de los pedidos. Esto puede ser resuelto mediante el problema de *Bin Packing Problem* y *Nesting and scheduling*.

Por otro lado, se recomienda automatizar el proceso para los pedidos de impresión mediante un aplicativo web en el que el usuario pueda ingresar la información mínima requerida para realizar el pedido de impresión (color, material, características del pedido). Posteriormente, el mismo programa logre parametrizar los proyectos y colocar los datos en la metodología propuesta, de esta forma, el monitor tendrá que asistir solo a realizar la impresión de los pedidos sin tener que preocuparse por verificar el correo electrónico, ver los pedidos a realizar y parametrizarlos a código G.

De igual manera, se propone aplicar *Lean Manufacturing* a los procesos de manufactura realizados en la instalación como por ejemplo VSM, 5s, poka yoke, Sistema Andon y jidoka de acuerdo a las necesidades que se requieran. El sistema Andon permite a través de mecanismos visuales (alarmas) conocer si hay un problema en el proceso y saber si se requiere de asistencia por parte del personal, este puede ser de ayuda puesto que las impresoras 3D frecuentemente atascan material en las boquillas de impresión y el personal del CAP no se da cuenta a tiempo, incurriendo en un mayor tiempo de procesamiento y desperdicio de material, de igual forma, esta se puede modificar para alertar al operario que el proceso de impresión ha culminado. Mediante las 5s se puede mejorar el lugar de trabajo permitiendo más productivo y permitiendo conocer todos los lugares de las instalaciones y la ubicación de cada herramienta, mejorando su efectividad.

La tardanza de los pedidos se pueden abordar con alternativas de solución propuesta en la exploración de ideas, el mantenimiento de las máquinas a través de un TPM podría disminuir la avería de estas y permitir que su funcionamiento aumente, evitando errores y posibles daños en los pedidos de impresión, así como también la organización en los espacios de trabajo puesto que el disponer de los insumos necesarios para el correcto funcionamiento del servicio permitirá prestarlo de una manera eficiente.

Por último, se propone una solución sostenible a la coordinación en donde se recicle todos los desperdicios de filamento mediante la extrusión, inyección, compresión y trituración del material para así crear un filamento propio que no genere contaminación, dicha solución permitirá hacer un registro de los desperdicios y tener una mejora ambiental.

VII. GLOSARIO

PLA: Es un poliéster biodegradable y bioactivo compuesto por componentes básicos de ácido láctico, siendo este uno de los plásticos más utilizados en la impresión 3D en la fabricación de filamentos fundidos [17].

ABS: Material usado en la impresión 3D para la fabricación de filamentos fundidos, que, a diferencia del PLA, este es el más indicado cuando se busca la fuerza en el resultado o cuando lo que se va a imprimir va a quedar expuesto a temperaturas extremas [18].

Programa Cura: Software de impresión 3D en el que se puede modificar los parámetros de impresión y después transformarlos a código G [19].

Código G: Es un fichero que contiene programación como un listado de instrucciones sencillas que la impresora sigue para realizar la impresión correctamente [20].

Archivo STL: Es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora (CAD) que define la geometría de los objetos 3D [21].

Diseño asistido por computadora (CAD): Es el uso de ordenadores para complementar la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño [22].

Makespan: En manufactura, el makespan es la diferencia de tiempo entre el inicio y finalización de una secuencia de trabajos o tareas [23].

NP- Complete: Es un problema *NP* que puede ser reducible en tiempo polinomial a otro problema *NP* [24].

NP-Hard: Es un problema que es al menos tan difícil como un problema *NP-Complete* y posee la característica de que 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* [24].

Bin Packing problem: Es un problema de optimización combinatoria *NP-Complete* en el cual, dado un conjunto de ítems de tamaño variable, se busca acomodarlos dentro de contenedores de tamaño fijo, buscando optimizar el número de contenedores a utilizar, es decir, usando el menor número de contenedores para colocar el mayor número de ítems posible. En la variante de *One dimensional* solo cambia el número de dimensiones tanto de los ítems como de los contenedores [25].

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 [26].

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 [27].

Fabricación avanzada: Es un conjunto de tecnologías para realizar la fabricación de una manera más ágil y eficiente [28].

Problema de agendamiento de actividades: Busca asignar la máxima cantidad de actividades sin que estas sean superpuestas [29].

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 un conjunto de otras [30].

Algoritmo del vecino más cercano: Algoritmo para encontrar el nodo más cercano que genera de manera rápida un camino corto, pero ideal. No obstante, al no considerar globalmente todo el recorrido, otorga una buena solución, pero no la óptima [31].

Árbol de expansión mínimo (MST): Es un grafo ponderado o grafo con pesos $G(V, E)$, donde V contiene los vértices y E las aristas (en el que un arco es una conexión entre un vértice A y un vértice B con un peso w), busca determinar un subgrafo en el que todos los nodos estén conectados sin ciclos, de forma que la sumatoria entre sus aristas sea la menor [32]. Una alternativa para su solución es el algoritmo de Kruskal el cual busca escoger un óptimo local. En este sentido, el algoritmo de Kruskal es un ejemplo de un algoritmo voraz/avaro.

Algoritmo de optimización de colonias de hormigas (ACO): Este algoritmo busca imitar el rastro de feromona que usan las hormigas en la naturaleza para comunicarse cuando transitan en la búsqueda de su alimento. Sirve para encontrar el tour más corto que recorre un conjunto de nodos (en el caso del proyecto dicho tour comprendería la ruta que deben seguir la boquilla al depositar filamento) [33].

Matriz AHP: Método de decisión multicriterio que ayuda a seleccionar una alternativa frente a una serie de criterios o que suelen entrar en conflicto [34].

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 [35].

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 [36].

Manufactura aditiva por deposición fundida: Método de impresión en el que una pieza es desarrollada a partir de filamento fundido, el cual es depositado a la cama de impresión por una cabeza de extrusión [37].

VIII. REFERENCIAS

- [1] L. Gómez Reyes, Análisis Documental De Los Inconvenientes De La Impresión 3D, *3C Tecnología*, vol. 6, n.º 3, p. 53, 14 sep. 2017. Recuperado de: 3ciencias.com/wp-content/uploads/2017/09/ART-4.pdf
- [2] El Heraldo, “Revolución 3D también se imprime en Colombia”, 10 nov. 2015. Recuperado de: <https://www.elheraldo.co/tendencias/en-marcha-soluciones-3d-para-la-ciencia-e-industria-colombiana-227418>
- [3] Masuch, Thomas. CONSUMER PRODUCTS & ELECTRONICS INCREASINGLY IMPORTANT FOR AM MARKET, 20 mayo 2020. Recuperado de: <https://fon-mag.de/industry-news/2020/05-wohlers-report/?L=1>
- [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. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2018000100070&lang=es
- [5] 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]
- [6] B. Vincent, C. Duhamel, L. Ren and N. Tchernev, "An efficient heuristic for scheduling on identical parallel machines to minimize total tardiness", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 1737-1742, 2016 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.833>. [Accessed: 14- Feb- 2021]
- [7] I. Kucukkoc, «MILP models to minimize makespan in additive manufacturing machine scheduling problems, » *Computers and Operations Research*, pp. 58-67, 18 de enero de 2019 [En línea]. Recuperado de: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0305054819300152?token=6037E6C105C471A336CA893A178C2FBE7AEDCDB88E13528B659E39ED061DEED39B1075BB62331AD383B8589211E35A7D>
- [8] 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.
- [9] F. J. D. Barbadillo, “Programación de heurísticas para minimizar tiempos de retraso de trabajos con máquinas en paralelo”, Dep. Organización Industrial y Gestión de Empresas I Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2015. Recuperado de: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90240/fichero/TFG_Francisco+Dom%C3%ADnguez_2.pdf
- [10] A. Díaz Pérez, "Búsqueda local", El Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2021. [Online]. Available: <http://delta.cs.cinvestav.mx/~adiaz/anadis/LocalSearch.pdf>. [Accessed: 13- Feb- 2021]
- [11] L. Ceccaroni, "Inteligencia Artificial", Universitat Politècnica de Catalunya, 2012. [Online]. Available: https://www.cs.upc.edu/~bejar/ia/transpas/teoria/2-BH3-Busqueda_local.pdf. [Accessed: 14- Feb- 2021]
- [12] G. Álvarez, "Sistemas Inteligentes: Búsqueda local", 2020.
- [13] D. Yilmaz Eroglu and H. Ozmutlu, "MIP Models and Hybrid Algorithms for Simultaneous Job Splitting and Scheduling on Unrelated Parallel Machines", *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1-19, 2014 [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/519520/>. [Accessed: 14- Feb- 2021]
- [14] S. Westin, "Dremel 3D Printer Review - My Take on the Dremel Printer So Far", *Total 3D Printing*, 2021. [Online]. Available: <https://total3dprinting.org/dremel-3d-printer-review-review-idea-builder-far/>. [Accessed: 20- Feb- 2021]
- [15] P. Kongsri y J. Buddhakulsomsiri, “A mixed integer programming model for unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup time to minimize makespan and total tardiness”, *International conference on industrial engineering and applications*, 2020, Available: <https://sci-hub.se/10.1109/ICIEA49774.2020.9102086>.

- [16] M. Hulett, P. Damodaran and M. Amouie, "Scheduling non-identical parallel batch processing machines to minimize total weighted tardiness using particle swarm optimization", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 113, pp. 425-436, 2017 [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.037>. [Accessed: 14- Feb- 2021]
- [17] L.C. <<3D natives>>, "¿Qué tan ecológico es realmente el filamento PLA?", 23 julio. 2019. [En línea]. Recuperado de: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-23072019/>.
- [18] L.C. <<3D natives>>, "El filamento de ABS en la impresión 3D", 6 junio. 2019. [En línea]. Recuperado de: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>
- [19] A.M. <<3D natives>>, "Las características de Cura, el laminador más extendido en el mercado de la impresión 3D", 25 marzo. 2020. [En línea]. Recuperado de: <https://www.3dnatives.com/es/cura-laminador-para-impresion-3d-25032020/>.
- [20] V. Ventura. <<polaridad.es>>, "Crear G-code con cura", 4 diciembre. 2014. [En línea]. Recuperado de: <http://polaridad.es/gcode-cura-impresion-3d/>
- [21] A. Regidor. <<impresión 3Daily>>, 22 noviembre. 2016. [En línea]. Recuperado de: <https://www.impresion3daily.es/>
- [22] J. Lugo, «Ideasdi.com», "Diseño asistido por computador CAD para diseños industriales. [En línea]. Recuperado de: <https://ideasdi.com/recursos/diseño-asistido-por-computador/>
- [23] M. S. J. C. Salazar Hornig E., «Minimización del makespan en máquinas paralelas idénticas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia utilizando un algoritmo genético,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XIV, n° 1, pp. 43 - 51, 2013.
- [24] R. P. C. O. G. H. Eduardo Cárdenas Gómez, «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, n° 2, pp. 146 - 151, 2017.
- [25] J. P. O. G. R. S. N. N. a. O. Adriana Mexicano Santoyo, «Caracterización de instancias difíciles del problema de Bin Packing orientada a la mejora de algoritmos metaheurísticos,» *Computación y Sistemas*, vol. 19, n° 2, pp. 295 - 308, 2015.
- [26] R. E. Korf, «A complete anytime algorithm for number partitioning,» *Artificial Intelligence*, vol. 106, pp. 181- 203, 1998.
- [27] N. Y. S. N. M. Horacio Hideki Yanasse, «An Algorithm for Determining The K-Best Solutions of The One - Dimensional Knapsack Problem,» *Pesquisa Operacional*, vol. 20, n° 1, 2000.
- [28] I. P. Jorge Torres, «Fabricación avanzada, más allá de la industria 4.0,» *minsait*, 27 noviembre 2017. [En línea]. Available: https://www.minsait.com/sites/default/files/newsroom_documents/fabricacion_avanzada_mas_alla_de_la_industria_4.pdf. [Último acceso: 24 11 2020].
- [29] A. S. Tiehua Cao, «Task sequence planning using fuzzy Petri nets,» *IEEE*, vol. 25, n° 5, pp. 755 - 768, 1995.
- [30] P. M. Vallejo, «Web. upcomillas,» 17 diciembre 2012. [En línea]. Available: <https://web.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/Regresion.pdf>.
- [31] T. S. Stava, «Analytics Vidhya,» 26 marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2018/03/introduction-k-neighbours-algorithm-clustering/>.
- [32] J. H. L. S. Ning Li, «Design and analysis of an MST- based topology control algorithm,» *IEE*, vol. 4, n° 3, pp. 1195- 1206, 2005.
- [33] Y. Z. Jingan Yang, «An improved ant colony optimization algorithm for solving a complex combinatorial optimization problem,» *Applied Soft Computing*, vol. 10, n° 2, pp. 653 - 660, 2010.
- [34] C. S. D. P. D. G. Adel Mendoza, «Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 27, n° 3, 2019.
- [35] D. Montgomery, *Control Estadístico De La Calidad*, Grupo Editorial Limusa, 2006.
- [36] B. S. López, «Mantenimiento Productivo Total (TPM),» 01 noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/mantenimiento-productivo-total-tpm/>. [Último acceso: 23 11 2020].
- [37] S. S. Restrepo, «3Dnatives el sitio web de la impresión 3D,» 10 octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/#!>

IX. ANEXOS

TABLA X
TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo (propio o terceros)	Tipo de Archivo (PDF, HTLM, Excel, Word...)
1	2020208 - Anexo 1. Encuesta: Calificación del servicio de impresión 3D en el centro de automatización de procesos (CAP)	Propio	Excel
2	2020208 - Anexo 2. Costos del servicio de impresión 3D	Tercero (Centro de automatización)	Word
3	2020208 - Anexo 3. Justificación prioridades grupos de interés	Propio	Word
4	2020208 - Anexo 4. Entrevista con el coordinador del CAP Juan David Contreras: Entendimiento de las necesidades del cliente (VoC)	Propio	Word
5	2020208 - Anexo 5. Formato Plan De Recolección de Datos (PRD)	Propio	Excel
6	2020208 – Anexo 6. Diagrama de flujo: Elaboración de pedidos de impresión 3D	Propio	Word
7	2020208 - Anexo 7. Hoja de Trabajo Situación Actual	Propio	Word
8	2020208-Anexo8-Detalles De Impresión 3D	Propio	Excel
9	2020208-Anexo9-Regresión Múltiple	Propio	Excel
10	2020208-Anexo10-Hoja De Recolección De Datos	Propio	Excel
11	2020208-Anexo11-Modelo De Simulación en SIMIO	Propio	Word
12	2020208-Anexo12-Regresión Múltiple Con Nuevos Factores	Propio	Excel
13	2020208-Anexo13-Formato Revisión De Literatura	Propio	Word
14	2020208-Anexo14-Matriz AHP	Propio	Excel
15	2020208-Anexo15-Cronograma En Project	Propio	Project
16	2020208-Anexo16-Metodología CAP	Propio	Libro binario de Excel
17	2020208-Anexo17-Recolección de datos validar	Propio	Excel
18	2020208-Anexo18-Encuesta Satisfacción Personal del CAP	Propio	Excel
19	2020208-Anexo19-Encuesta Satisfacción Usuarios del CAP	Propio	PDF
20	2020208-Anexo20-Manual de Usuario	Propio	Word
21	2020208-Anexo21-Manual de Instalación	Propio	Word