

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



**MEJORA DEL PROCESO DE ASIGNACIÓN DE
TAREAS DE MODELADO ESTRUCTURAL**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería Industrial

AUTOR(ES)

Santiago Alvaro Burga Benavides (ORCID: XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)

Patricio Carlos Yrigoyen Alarco (ORCID: XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)

ASESOR(ES)

Fabien Yves Paul Cornillier

Lima – Perú

2020

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	8
1.1. Contexto	8
1.2. Proceso de producción de ACEDIM®	9
1.3. Los pedidos especiales como urgencias	11
1.4. Urgencias de producción: Causas controlables y no controlables	12
1.5. Propuesta de mejora y métodos para alcanzarla	14
MARCO TEÓRICO	15
2.1. VDC y BIM	15
2.1.1. Modelado de Concreto	17
2.1.2. Modelado de Acero	17
2.1.3. Dibujo	18
2.2. Variabilidad del sector: causas de los pedidos especiales	19
2.3. Procesos de asignación de tareas	23
2.3.1. Diversas industrias	23
2.3.2. Asignación de tareas en TSC Innovation	24
2.3.2.1. Asignación de modelado de concreto y acero	24
2.4. Algoritmos y enfoques para la asignación de tareas	28
2.4.1. Job Assignment Problem	28
2.4.2. Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem (UPM)	31
2.4.3. Aplicación en TSC Innovation	33

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	34
METODOLOGÍA	35
4.1 Rediseño	35
4.1.1 Proceso TO-BE	35
4.2 Pronóstico del retraso (Retpj)	37
4.2.1 Variable de decisión	37
4.2.2 Parámetros	38
4.2.3 Lógica de Algoritmo	39
4.2.4 Solución: Algoritmo	42
4.3 Diseño de metodos de recoleccion de datos	46
RESULTADOS	55
5.1. Causas de la calidad de los resultados	58
5.2. Elección del método para el cálculo del tpj	59
5.3. Impacto	60
DISCUSIONES	63
CONCLUSIONES	67
AGRADECIMIENTOS	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	71

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Ratio de Horas Hombre (HH)/Tn por estructura para cada tarea.	19
Tabla 4.1: Datos de dificultad de una obra, tiempo de familiarización y porcentaje de variación de tiempo	54
Tabla 5.1: Métricas proceso AS-IS y TO-BE	61
Tabla 6.1: Métricas proceso AS-IS, TO-BE y WHAT-IF	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Modelo BIM, ACEDIM® y estructura.	9
Figura 1.2: Flujo del proceso de TSC Innovation.	10
Figura 1.3: Días entre la fecha de envío a fabricar y la fecha de entrega del producto para proyectos en Lima.	11
Figura 1.4: Pareto de motivos de envíos tardíos de entregables a la planta de CAASA	13
Figura 2.1: Conflicto entre elementos detectado gracias a un modelo BIM.	16
Figura 2.2: Proceso de asignación de tareas AS-IS	25
Figura 4.1: Proceso de asignación de tareas TO-BE	36
Figura 4.2: Lógica introductoria del algoritmo asignador	37
Figura 4.3: Flujo de Información	43
Figura 4.4: Flujo de lógica de algoritmo	46
Figura 4.5: Distribución de empleados por experiencia	49
Figura 4.6: Relación entre tiempo neto de tarea y experiencia para cuatro obras	50
Figura 4.7: Curva de aprendizaje, relación entre experiencia y tiempo de realización de una tarea	51
Figura 4.8: Relación entre dificultad y tiempo de familiarización con un proyecto	53
Figura 5.1: Resultados de regresión lineal con la recolección de datos 1	55
Figura 5.2: Resultados de regresión lineal con la recolección de datos 2	56
Figura 5.3: Resultados de regresión lineal con la recolección de datos 2 y excluyendo las variables no significativas	57
Figura 5.4: Horas de tarea por peso para cada experiencia de los modeladores Fuente: Elaboración propia	58
Figura 5.5: Simulaciones del algoritmo asignador de tareas	60
Figura 6.1: Proceso de asignación de tareas WHAT-IF	64

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Código del Algoritmo en Python	71

RESUMEN

Esta tesis tiene como objetivo mejorar el proceso de asignación de tareas de ingeniería de detalle en TSC Innovation para reducir los envíos tardíos a la planta de la Corporación Aceros Arequipa a menos del 5%. Empleando los problemas de optimización *Job Assignment Problem* y *Unrelated Parallel Machine Scheduling* se desarrolla un algoritmo en Python para resolver el problema. Como resultado el tiempo del proceso se logró reducir de 4-5 horas a tan sólo 25-30 minutos.

PALABRAS CLAVES:

algoritmo; python; modelado estructural; *Job Assignment Problem*; *Unrelated Parallel Machine Scheduling*

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF THE STRUCTURAL MODELING TASK ASSIGNMENT PROCESS

This thesis aims to improve the structural modeling task assignment process of TSC Innovation in order to reduce late orders to the Aceros Arequipa Corporation factory to less than 5%. Using theory from the *Job Assignment Problem* and *Unrelated Parallel Machine Scheduling* optimization problems, a Python algorithm is developed to solve the problem. As a result, the cycle time of the process is reduced from 4-5 hours to just 25-30 minutes.

KEYWORDS:

algorithm; python; structural modeling; *Job Assignment Problem*; *Unrelated Parallel Machine Scheduling*

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

El sector de construcción representa el 5% del PBI Peruano y es el 5to sector más importante para la economía del Perú [1]. En los últimos años este se ha ido modernizando, adoptando rápidos cambios tecnológicos y las herramientas que estos proveen. Estos cambios trajeron metodologías innovadoras como es el caso del Virtual Design Construction (VDC) elaborado por el Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) de la universidad americana Stanford. El VDC es una metodología colaborativa entre los equipos de diseño y construcción donde los arquitectos e ingenieros trabajan para gestionar procesos eficientes basados en modelos virtuales 3D llamados Building Information Modeling (BIM) [2]. En ellos pueden ver a detalle el proyecto, presupuestos, cronogramas de entrega, cantidad exacta de materiales a entregar, etc. y tomar decisiones antes de que se ejecuten. Se hace esto con el objetivo de optimizar el uso de materiales, tiempos de entrega, costos y prever problemas.

En el Perú ya se ha empezado a implementar la metodología VDC, un caso de éxito de esta se ve en la empresa TSC Innovation, subsidiaria de la Corporación Aceros Arequipa S.A. (CAASA). Esta empresa se encuentra enfocada en el modelado estructural (concreto, acero e insertos) de proyectos de construcción nacionales e internacionales. Para los proyectos nacionales (50% de su cartera de clientes) trabajan con Aceros Arequipa para ofrecer acero dimensionado, ACEDIM® Fig 1.1. El ACEDIM®, es un producto de Aceros Arequipa que consta de barras de acero cortadas y dobladas a medida para armar una estructura (columnas, vigas, losas, entre otras). Antes que se introdujera el ACEDIM® los clientes mismos se encargaban de cortar y doblar las barras de acero que compraban. Esto tomaba tiempo, se hacía con procesos artesanales y era necesario tener mano de obra capacitada para realizarlo. Al ver la oportunidad, Aceros Arequipa se alió con TSC Innovation para gestionar el proyecto y abrió esta nueva línea de productos. Ofrecen

entregar el acero cortado y doblado a medida acompañado de unos planos para facilitar su instalación en la obra.

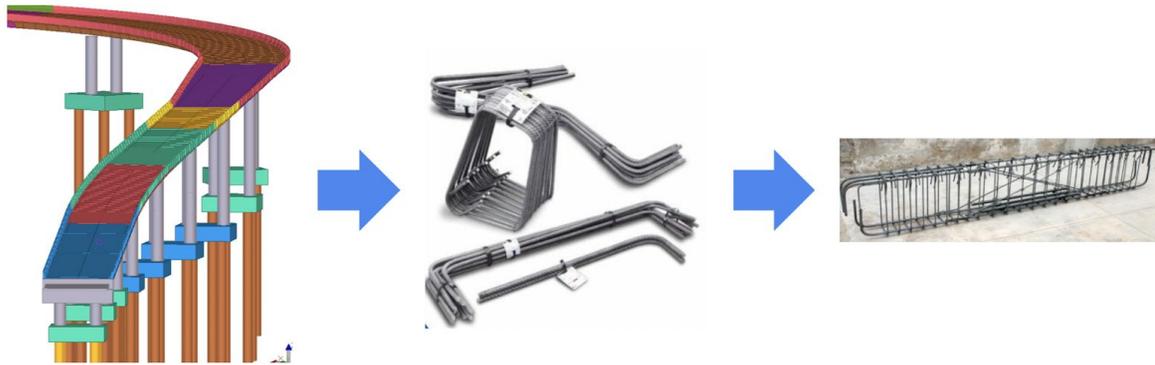


Figura 1.1: Modelo BIM, ACEDIM® y estructura.

Fuente: Elaboración propia

1.2. Proceso de producción de ACEDIM®

El flujo de los proyectos que solicitan el ACEDIM® se muestra en la Figura 1.1. Cada vez que CAASA recibe un proyecto, este requiere una serie de pasos previos a la fabricación del pedido del cliente. Primero, el Jefe de Ventas de Aceros Arequipa cierra la venta y documenta las especificaciones del proyecto. Luego, se contacta con la empresa TSC Innovation y le transmite la información necesaria (planos CAD 2D, contrato, cronograma de entregas, entre otros). Con ella, la obra es registrada y un coordinador de obra procede a descomponer el proyecto en estructuras. Cada estructura es asignada a una persona para que pase por las distintas fases de modelado y dibujo dependiendo de los requisitos del proyecto. Esta asignación de tareas es hecha por el jefe del área de ingeniería de manera manual y subjetiva, esto hace que sea propensa a errores de asignación que tienen como consecuencia la mala distribución de la carga de trabajo entre los empleados y los incumplimientos con las fechas de entrega.

Las fases del proceso de modelado son: el modelado de concreto que tiene como entregable un modelo BIM de concreto, el modelado de acero que tiene como entregable un modelo BIM estructural y, por último, el dibujo que tiene como entregable los planos de ingeniería de detalle. Este entregable muestra cada elemento modelado, la cantidad de piezas necesarias y su ubicación en la estructura para el armado en la obra. El lead time establecido de un proyecto de este tipo, desde el registro de la obra hasta la fecha de entrega del producto ACEDIM®, es de 15 días.

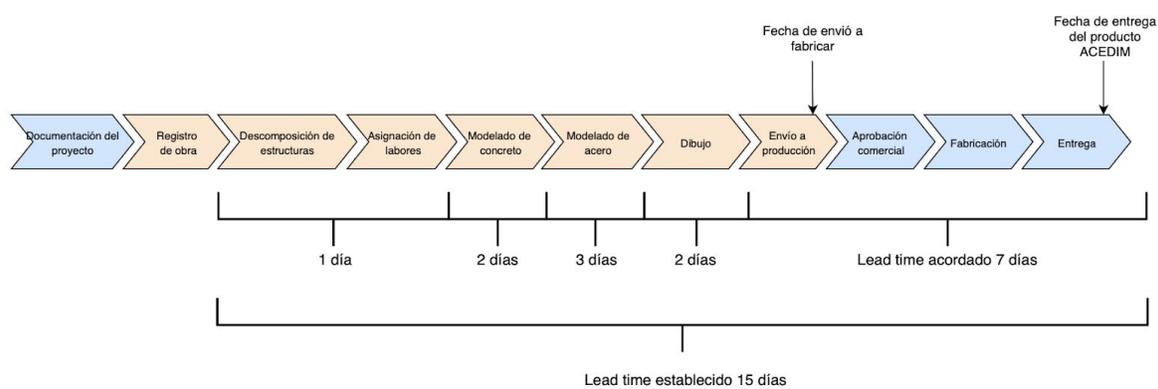


Figura 1.2: Flujo del proceso de TSC Innovation.

Fuente: Elaboración propia

Antes que el área de producción pueda comenzar a fabricar los entregables enviados a planta, el área comercial debe aprobar la línea de crédito del cliente. Luego de la fabricación, el área de cadena de suministros se encarga de la logística de envío del pedido a la obra.

TSC Innovation tiene un acuerdo con Aceros Arequipa que establece que el lead time entre la fecha de envío a fabricar y la fecha de entrega del producto ACEDIM® debe ser entre 4 y 7 días como mínimo para obras en Lima Fig 1.2. Todo lo enviado a fabricar con menos de 4 días es considerado una urgencia para la planta.. Como podemos ver en el Fig 1.3 utilizando la data de los últimos 3 meses para la entrega de pedidos en Lima y aplicando un factor de corrección para asegurar la confidencialidad de la información, TSC

Innovation ha fallado en cumplir este acuerdo. Las urgencias para la planta representan el 8.63% del total de pedidos. Este porcentaje de pedidos considerados urgencias le generan costos extras a la planta de Aceros Arequipa y a TSC Innovation al tener que ser producidos en horas extras. El costo de esas horas extras para fabricar las urgencias es de USD 90,000.00 para la planta y de USD 5,000.00 para TSC Innovation en los últimos tres meses.

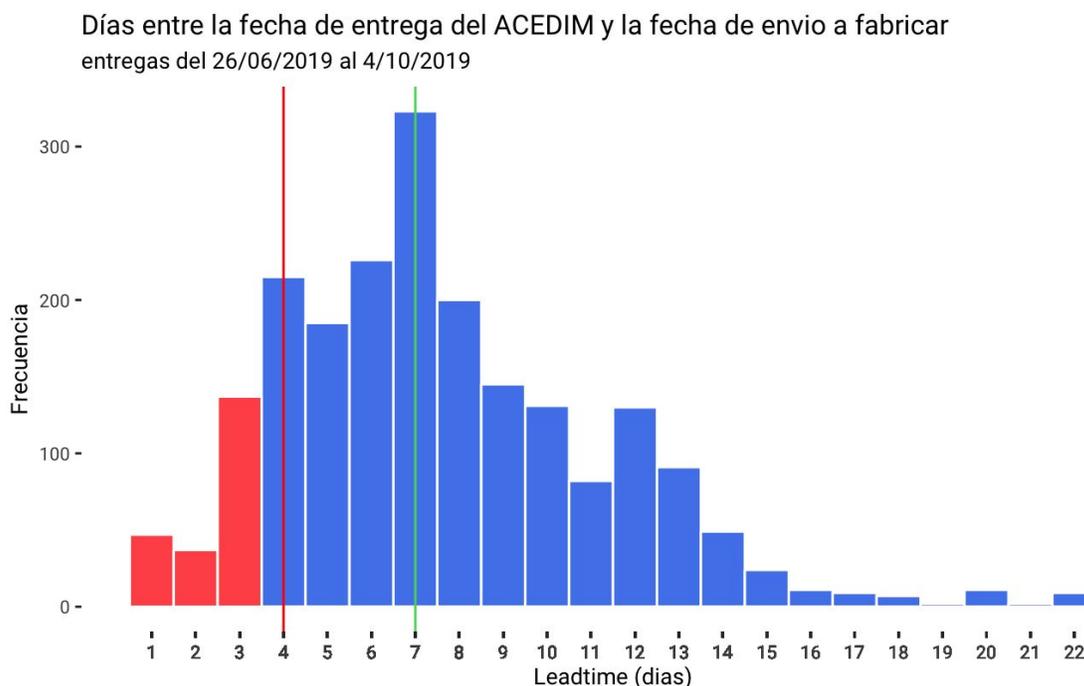


Figura 1.3: Días entre la fecha de envío a fabricar y la fecha de entrega del producto para proyectos en Lima.

Fuente: Elaboración propia.

1.3. Los pedidos especiales como urgencias

A lo largo del desarrollo de un proyecto, aparecen frecuentemente “pedidos especiales del cliente”, es decir pedidos en los cuales se solicita un lead time menor al establecido para el proyecto Fig 1.1. La causa de estos pedidos se atribuye a la mala

planificación del cliente que se ve frecuentemente en el sector. La existencia de pedidos especiales fuerza a TSC Innovation a priorizarlos para limitar el riesgo de que el cliente tenga que parar la obra hasta la entrega del ACEDIM®, generando penalidades, mano de obra paralizada y gastos operativos que ascienden a costos de entre 100,000 y 300,000 soles al día ocasionados al cliente.

Por lo general, TSC Innovation logra atender el pedido especial del cliente pero muchas veces este termina convirtiéndose en una urgencia para la planta de producción. La empresa tiene la capacidad instalada suficiente para modelar y enviar estos pedidos a fabricar antes que se conviertan en una urgencia, pero su mala asignación de tareas no se lo permite.

1.4. Urgencias de producción: Causas controlables y no controlables

Identificando los motivos de estas urgencias Fig 1.4, vemos que la causa principal son los pedidos especiales de los clientes que se convirtieron en urgencias, estos representan el 48.56% del total de urgencias. La segunda causa más relevante son las demoras en diseño (modelado y dibujo) que representan el 27.94% del total de urgencias. Las demoras en diseño se deben a que se dejó de hacer un proyecto para atender un pedido especial de un cliente y cuando se retomó no se pudo cumplir con la fecha de envío a planta. Las demoras en diseño representan la causa más importante de urgencias sobre la cual TSC Innovation tiene control.

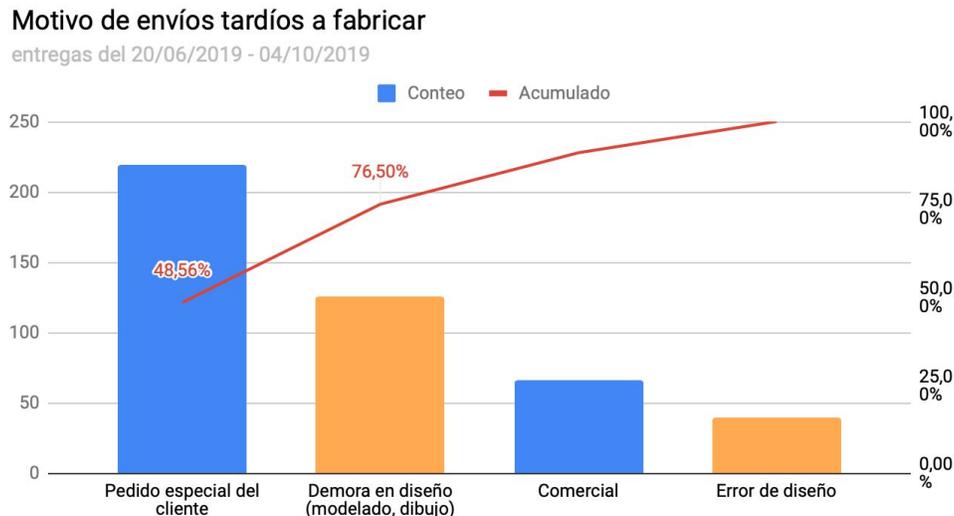


Figura 1.4: Pareto de motivos de envíos tardíos de entregables a la planta de CAASA

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la situación actual en TSC, se identifica que los pedidos especiales son propios del sector y no se tiene control sobre ellos. La empresa cuenta con buffers de capacidad para atenderlos, pero el proceso de asignación de tareas cuenta con demoras, lo que hace que, estas tareas no se lleguen a atender a tiempo. El proceso de asignación de tareas cuenta con un tiempo de ciclo de 4 a 5 horas, es por eso que el jefe de ingeniería solo asigna tareas los viernes de cada semana. De esta manera, si un cliente realiza un pedido especial un lunes, existe la posibilidad que el jefe de ingeniería recién lo asigne el viernes y se pierdan 5 días, en los cuales un modelador pudo haber comenzado y terminado el modelado de esa estructura. Por otra parte, encontramos que la asignación de tareas actual no es buena. Como se explica en la sección 2.3 el proceso es subjetivo y propenso a errores como, por ejemplo, que una única tarea sea asignada a dos personas distintas o que una tarea no sea asignada a tiempo y se convierta en una urgencia. Por eso, se considera la mala asignación de tareas y el tiempo de asignación la causa-raíz de los problemas en la empresa

estudiada. Solucionar esto ayuda a gestionar mejor la carga laboral de los modeladores para que puedan atender pedidos especiales del cliente en un menor tiempo. Al reducir el tiempo de ciclo se podrá asignar con mayor frecuencia y así poder atender los pedidos especiales antes que se conviertan en una urgencia.

1.5. Propuesta de mejora y métodos para alcanzarla

Esta investigación tiene como objetivo general mejorar el proceso de asignación de tareas de ingeniería de detalle en TSC Innovation para reducir los envíos tardíos a planta. Para ello se deben identificar los factores que afectan al tiempo de realización de tareas de modelado para estimar el tiempo de realización de una tarea. Además, se debe rediseñar el proceso de asignación para reducir el tiempo de asignación de tareas dentro de TSC Innovation.

MARCO TEÓRICO

2.1. VDC y BIM

El Virtual Design and Construction (VDC) se introdujo en el 2001 por el Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) de Stanford University. Se desarrolló con el objetivo de incrementar la productividad del sector de construcción que presentaba una disminución significativa a comparación con la de los demás sectores industriales que iban al alza [2]. El VDC es una metodología colaborativa que busca mayor calidad en el diseño, seguridad y eficiencia en la gestión de proyectos de la industria AEC (Architecture, Engineering and Construction) a partir del control del Producto, Organización y Procesos [3]. Entiéndase Producto como el diseño de la edificación, Organización como los agentes que van a formar parte del proyecto y Procesos como las actividades que lo van a llevar a tener éxito [4].

Para permitir el flujo de información inmediata, que previamente tomaba días o meses y dependía altamente de documentos físicos, la metodología utiliza como herramienta primordial el BIM. El BIM o Building Information Modelling no tiene un significado único. Azhar, S et al, [5] define el BIM como “un proceso virtual que integra todos los aspectos, disciplinas y sistemas de una construcción en un solo modelo virtual que permite a todos los miembros de un proyecto a colaborar en las distintas etapas de una construcción”. Por otra parte, Barlish y Sullivan [6] lo definen como una representación digital en 3D de las características físicas y funcionales de una construcción durante todo su ciclo de vida. Se utiliza como una herramienta colaborativa, altamente confiable que ayuda a arquitectos, ingenieros y constructores a tomar decisiones en las distintas etapas de la construcción. Para alinear nuestra definición del BIM con la definición de TSC Innovation, nos referiremos al BIM como una representación digital 3D de una construcción.

La diferencia entre la tecnología BIM y la tecnología CAD 3D y 2D, es que la segunda representa vistas de una construcción en 3D o 2D que son independientes entre sí.

Editar una de estas vistas requiere que el resto sean verificadas para asegurar que no se hayan generado errores con esta modificación, ya que las vistas no se redimensionan por sí solas. En cambio, la tecnología BIM presenta inteligencia dimensional al redimensionar automáticamente las vistas 3D con cada cambio realizado al modelo [5].

Kunz y Fischer [4] manifiestan que gracias al VDC los agentes de un proyecto de construcción:

- Les es considerablemente más fácil entender un modelo BIM que un plano CAD 3D o 2D y debido a que es un modelo gráfico el idioma deja de ser una barrera.
- Pueden detectar errores que no se hubiesen detectado hasta el momento de la construcción y corregirlos para que no sucedan en la vida real Fig 2.1.

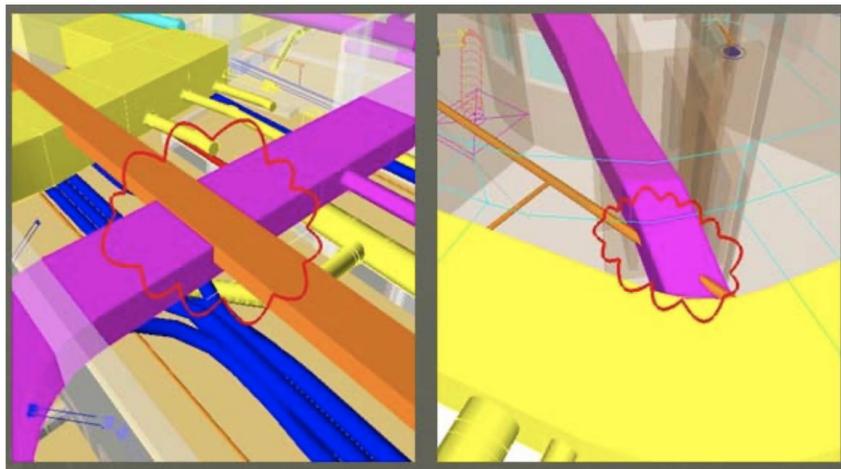


Figura 2.1: Conflicto entre elementos detectado gracias a un modelo BIM. [5]

- Se puede utilizar para crear pedidos de los materiales necesarios y/o fabricar y manejar los tiempos de entrega.
- Se puede monitorear cambios y el avance del proyecto en tiempo real.

El VDC y BIM son una metodología y una herramienta revolucionaria respectivamente, la National Building Specification [7] identificó desafíos para la implementación de ellos que son los siguientes:

- Relevancia: muchas empresas piensan que el BIM solo sirve para proyectos de gran magnitud y que no es relevante para los proyectos que ellos realizan. Con el tiempo se ha probado lo contrario.
- Costo: se debe incurrir en costos de software, hardware, capacitaciones y tiempo para poder implementarlo dentro de una organización
- Conocimientos: 62% de empresas pequeñas (menos de 5 empleados) y 77% de empresas con más de 6 empleados indicaron que no tienen los conocimientos necesarios para implementar BIM [7].

En TSC Innovation la metodología y el BIM se han implementado de la mano para gestionar todas las obras que optan por el producto de ACEDIM a través del software TEKLA para realizar el modelado de concreto y acero. Con estas herramientas los dibujantes son capaces de realizar los planos de ingeniería de detalle para los clientes. El flujo de un proyecto que utiliza estas herramientas es el siguiente:

2.1.1. Modelado de Concreto

Todo comienza con el modelado de concreto de cada estructura desglosada en el proceso anterior Fig 1.2. Los modeladores se basan en los planos originales de la obra para realizar el primer modelo BIM, en el software TEKLA. Se modela con el objetivo de visualizar la geometría 3D de la estructura para luego colocar el acero. El tiempo y la dificultad del modelado de concreto va a depender de la estructura a trabajar y las toneladas de esta. Teóricamente se manejan ratios internos para el cálculo del tiempo de la actividad.

2.1.2. Modelado de Acero

Esta actividad, que requiere alta precisión, tiene como objetivo indicar los detalles de las barras de refuerzo (ubicación, espacio, tamaño y cantidad) que irán dentro de la

estructura de concreto. El modelador realiza el diseño de la armadura de acero sobre el modelado de concreto y gracias al software TEKLA puede exportarlos como planos para los dibujantes.

Dentro de TSC Innovation existen 3 tareas de modelado de acero.

- 2D: No todos los clientes optan por modelos BIM debido a los desafíos comentados en la sección anterior. Para ellos se realiza un modelado de acero en CAD 2D.
- BIM: Adoptando las tecnologías mencionadas y el software TEKLA los modeladores proceden a realizar la tarea sobre el modelado de concreto del punto anterior.
- PAC: Indiferentemente si es modelado de acero 2D o BIM si la estructura que se modelo no tiene ningún corte o doble y consiste de una barra de acero se considera como PAC (Pedido ACEDIM®).

De igual forma los ratios teóricos para la realización del modelado de acero se encuentran en la Tabla 2.1.

2.1.3. Dibujo

El proceso de dibujo consiste en pasar los modelos de acero a planos de ingeniería de detalle. En ellos se indica la cantidad de piezas, las formas, cotas, ubicación, peso y demás características importantes para la fabricación e implementación de la estructura en obra.

Dependiendo del servicio que se le brinda al cliente se puede dividir el proceso en:

- CAD: para las obras que se han trabajado en 2D
- BIM: para las obras que se han trabajado en BIM
- Sketch: se realiza indiferentemente de si se requiere un dibujo CAD o BIM y consiste en preparar los planos para una revisión rápida por el cliente. Una vez aprobado se realiza el dibujo CAD o BIM.

Estructura	01.Modelado de concreto	02.Modelado de acero BIM	03.Modelado de acero 2D	04.Dibujo BIM	05.Dibujo 2D
BARRAJE	1.00		0.33		
CAISSON	0.31	0.50			
COLUMNA	0.10	2.09	1.66	1.32	0.40
COLUMNA/PLACA		0.80		0.38	
ESTRIBO	0.30	0.50			
LOSA DE APROX	1.00	1.33		1.50	
LOSA ALIG	0.15		3.00		1.00
LOSAMAC	0.15		2.35		0.60
LOSAPOS	0.10	4.00	2.50	2.00	0.25
LOSAS	0.05	0.45		0.16	
MURO DL	0.10		1.71		1.20
MUROS	0.10	0.47		0.33	
PEDESTAL	0.10	1.37	0.36	0.48	0.12
PILAR	0.05	0.36		0.20	
PILOTE	0.05	1.00		1.60	
PLACA	0.10	2.00	1.30	2.66	1.00
VIGA	0.32	2.47	2.19	1.50	0.40
VIGA CABEZAL	0.10	1.00		1.00	
VIGA PREARM.			2.00		1.00
VIGACIM	0.20	2.60	1.88	0.60	0.40
ZAPATA	0.25	2.00	0.66	3.82	0.40

Tabla 2.1: Ratio de Horas Hombre (HH)/Tn por estructura para cada tarea. [8]

2.2. Variabilidad del sector: causas de los pedidos especiales

Se interpreta la variabilidad en el sector de construcción como una de las causas-raíz o razones por las que existen retrasos en un proyecto de construcción. Se toma como agentes principales de un proyecto de construcción, al dueño del proyecto y al contratista. Según los autores Fisk y Reynolds [9] se pueden atribuir los retrasos de las obras de construcción a 10 causas-raíz comunes que introducen variabilidad en el sector:

1. Retrasos ocasionados por el dueño
2. Ordenes de cambio por el dueño
3. Cambios constructivos
4. Diferencias en las condiciones de campo
5. Condiciones atmosféricas desfavorables
6. Aceleración del trabajo
7. Suspensión del trabajo
8. Error al cotizar los precios de materiales y equipos
9. Errores en el expediente técnico
10. Problemas misceláneos

Por lo general, antes de definir qué actor del proyecto es responsable por el impacto que genera un retraso en específico en una obra de construcción se define la causa de este [11]. Identificar los retrasos en una obra es de suma importancia tanto para el dueño de la obra como para el contratista porque estos significan un alargamiento en el plazo del proyecto. Marroquín, D [11] nos dice que los retrasos traen como consecuencia, además de una extensión de tiempo en el trabajo, un incremento en el costo del proyecto que lo incurren el dueño y el contratista.

Una vez que se entiende la causa de la variabilidad natural en el sector y sus consecuencias, se identifican las causas de los retrasos típicos ocasionados tanto por el dueño como por el contratista del proyecto. Esto ayuda a entender mejor la situación de TSC Innovation y las causas no controlables del retraso de sus proyectos que son propias de la variabilidad del sector.

Para explicar la variabilidad del sector en el Perú, se toman las causas típicas de retrasos ocasionados por el dueño de un proyecto que Fisk & Reynolds [9] identifican como:

- Aprobación tardía de los planos de ejecución y las muestras
- Aprobación tardía en las pruebas de laboratorio
- Demoras en responder al contratista sobre inquietudes en el campo de trabajo
- Cambios en el método de trabajo del contratista
- Variaciones en las cantidades estimadas
- Interferencia con el contratista durante la construcción
- Cambios en el cronograma por el dueño
- Cambio de diseño
- Cambios en el nivel de inspección
- Fallas en proveer acceso al sitio de trabajo
- Falta de requerimiento de vías de acceso
- Interferencias con otros contratistas del dueño

De igual manera, se toman las causas típicas de retrasos ocasionadas por el contratista [9]:

- Entrega tardía de los planos de ejecución
- Adquisiciones tardías de materiales y equipos
- Personal insuficiente
- Personal no calificado
- Inadecuada coordinación con subcontratistas u otros contratos
- Retrasos del contratista
- Respuesta tardía a consultas del dueño o arquitecto/diseñador
- Construcción no conforme a los requerimientos del contrato, rehaciendo los trabajos que sean necesarios

Se analizan estas causas para luego poder filtrarlas y ver cuales son las más aplicables a la situación en TSC Innovation. La situación de la empresa es la existencia de pedidos especiales de parte de sus clientes. Como se mencionó en el primer capítulo de esta

investigación, los pedidos especiales son aquellos que se solicitan con un lead time menor al establecido para el proyecto por TSC Innovation y por ende son considerados como urgencias para la empresa. Estos pedidos especiales son consecuencias de la variabilidad del sector, pero la mala asignación de tareas por parte de TSC Innovation le quita a la empresa la capacidad de poder atenderlos lo suficientemente rápido y esto causa que se vuelvan urgencias Fig 1.2.

Se analizó la información recolectada en entrevistas a profesionales que forman parte de TSC Innovation, y se le atribuyen los retrasos en los pedidos especiales a las siguientes causas:

Por parte del dueño del proyecto, las causas principales que generan pedidos especiales, que no pueden ser entregados a tiempo, son:

- Variaciones en las cantidades estimadas
- Cambios en el cronograma por el dueño
- Cambio de diseño
- Cambios en el nivel de inspección

Por parte del contratista del proyecto, las causas principales que generan pedidos especiales, que no pueden ser entregados a tiempo, son:

- Entrega tardía de los planos de ejecución
- Retrasos del contratista
- Respuesta tardía a consultas del dueño o arquitecto/diseñador
- Construcción no conforme a los requerimientos del contrato, rehaciendo los trabajos que sean necesarios.

Este análisis es útil para justificar las causas-raíz sobre las cuales TSC Innovation no tiene control alguno. Es por eso que, descartando solucionar causas-raíces propias de la

variabilidad del sector, esta tesis se centra en la causa-raíz de la mala asignación de tareas por parte de la empresa estudiada.

2.3. Procesos de asignación de tareas

2.3.1. Diversas industrias

El proceso común para asignar tareas en una empresa es subjetivo para cada gerente. Tradicionalmente existe un proceso el cual lleva a los gerentes a conocer a sus empleados para poder delegar o asignar tareas de manera eficiente. Este proceso tiene como objetivo brindar el conocimiento necesario al gerente para que este pueda coincidir el perfil de una tarea con el perfil de un empleado [12].

La empresa inglesa Mindtools, dedicada a la enseñanza de manejo de personas desde 1996, describe los pasos del proceso de delegación de la siguiente manera [12]:

El primer paso consiste en realizar entrevistas individuales para conocer el perfil de cada empleado, saber qué responsabilidades tiene actualmente y si tiene los conocimientos y habilidades necesarios para cumplir con esas responsabilidades. Un gerente también debe conocer el estilo de trabajo preferido por el empleado y su carga de trabajo actual. Esta información es necesaria para decidir a quién se le puede asignar una tarea y debe estar actualizándose constantemente.

Una vez que se tiene conocimiento sobre lo mencionado previamente, el gerente debe establecer de manera clara el objetivo de la tarea delegada, las restricciones tanto de tiempo como económicas, proveer el soporte de recursos y si fuera necesario de capacitación.

Cuando la tarea ya ha sido asignada a una persona, se deben establecer medidas de control y supervisión para asegurar el cumplimiento de la tarea con las restricciones establecidas por el gerente.

2.3.2. Asignación de tareas en TSC Innovation

La empresa cuenta con un grupo de empleados a los que se le denomina “coordinadores de obra”. Ellos son los encargados de velar para que las estructuras sean entregadas a tiempo al cliente. Trabajan sobre un Google Sheets donde realizan el desglose de las estructuras denominado “Control” y funciona como consolidado de tareas realizadas y por realizar para un conjunto de obras de un determinado coordinador. Cada coordinador cuenta con su Control donde está el desglose de todas las obras que gestiona, con el objetivo que puedan programar las fechas de entrega, revisiones requeridas, especificaciones del acero, peso, piezas, entre otras características.

Por otra parte, el jefe de ingeniería, responsable de asignar todas las tareas, maneja un consolidado de todos los Controles. En él puede observar cuando van a ser terminadas las tareas, si se va a llegar a la fecha requerida del cliente, quien está realizando cada tarea, los detalles de la tarea y el backlog¹. Él es el encargado de asignar todas las tareas de modelado de concreto y acero para todas las obras, mientras que el dibujo lo asigna la responsable del equipo de dibujantes. La asignación de tareas se divide en dos:

2.3.2.1. Asignación de modelado de concreto y acero

Estas dos actividades vienen a ser las dos primeras tareas a realizar dentro del negocio de la empresa. Actualmente el jefe de ingeniería maneja tres documentos para realizar la asignación: (1) backlog de modelado, (2) Gantt de tareas en proceso de modelado y (3) control de qué tareas está realizando y ha realizado cada persona. Trabaja con una computadora de tres pantallas en la cual tiene abierto los tres documentos. El proceso de asignación de tareas en la empresa es de la siguiente manera:

¹ Lista de todo el trabajo pendiente a realizar

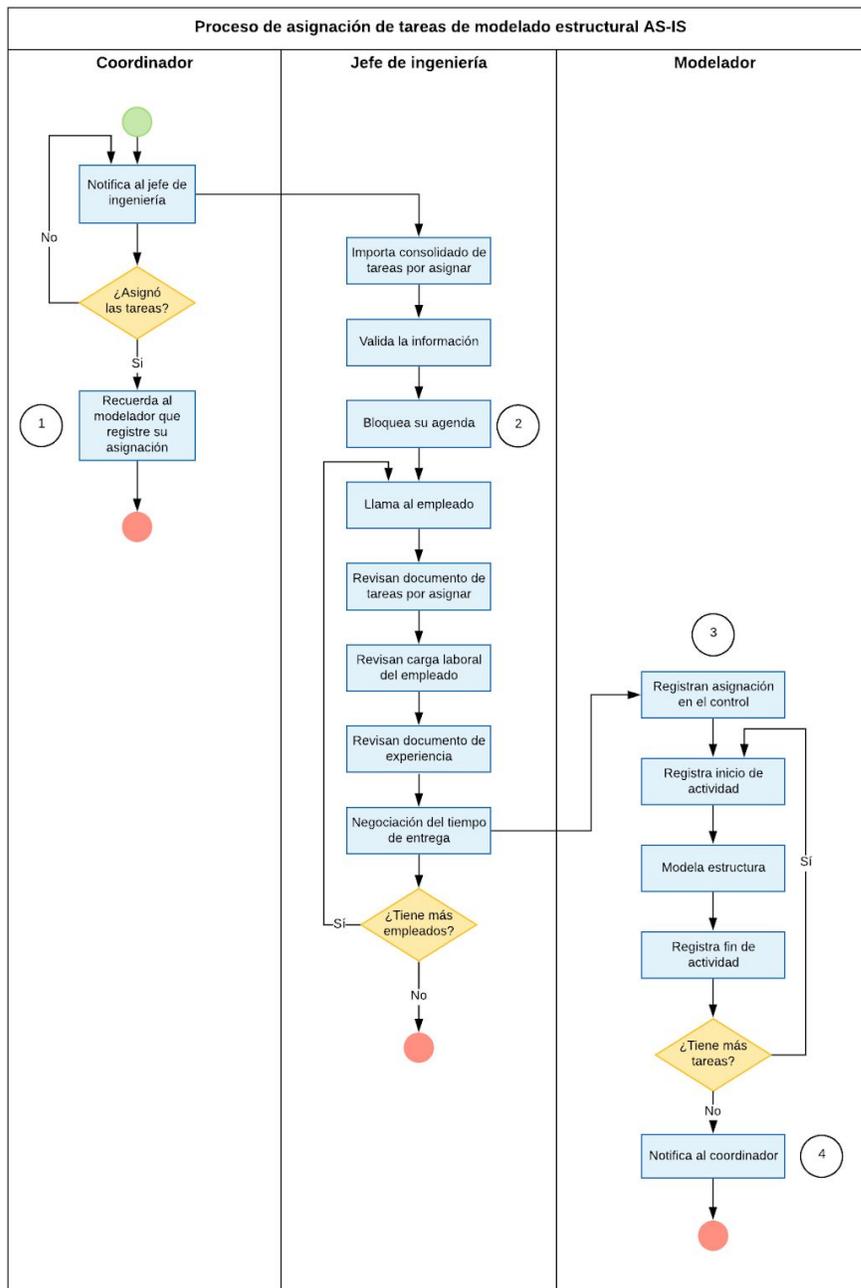


Figura 2.2: Proceso de asignación de tareas AS-IS

Fuente: Elaboración propia

En el punto (1) del flujo AS-IS del proceso de asignación de tareas se puede observar que, actualmente, el coordinador tiene que hacerle un seguimiento al proceso de asignación de tareas. Este seguimiento consiste en recordarle al jefe de ingeniería que hay tareas en los controles de ingeniería listas para ser asignadas. Esta es una acción crucial porque el tiempo entre que el coordinador desglosa la tarea y el jefe de ingeniería la asigna es un tiempo muerto. Al no aprovechar este tiempo, la empresa se está arriesgando a que los modeladores no puedan terminar las tareas a tiempo y que existan los envíos tardíos a planta por causa de una demora en el proceso de asignación.

En el punto (2) el jefe de ingeniería debe tomarse el tiempo de bloquear su agenda para poder recibir a los distintos modeladores y así asignarles tareas. Esta parte del proceso de asignación es la que más tiempo demora, entre 4 - 5 horas, ya que, se tiene que recibir, uno por uno, a todos los modeladores que no tengan tareas asignadas. Empleado por empleado pasan por su sitio y se le asigna tareas en base a:

1. Experiencia en esa obra: el primer criterio, si una persona ya había trabajado en una obra conoce las especificaciones y la etapa en que se encuentra el proyecto. Esto agiliza el comienzo de la tarea permitiendo que sea terminada en menor tiempo que una persona no familiarizada con la obra.
2. Expertise de la persona: conocimiento que tiene la persona en realizar la tarea de modelado de una determinada estructura.
3. Tiempo de realización: se calculaba en base a unos ratios teóricos de Horas Hombre (HH)/Tn por estructura y un cálculo de tiempo subjetivo que el modelador y el jefe de ingeniería creían en que él la podía terminar. Se dejaba abierto a la posibilidad que el tiempo de realización no sea el calculado y el modelador tenga que quedarse horas extras para terminar la tarea.

Esta actividad es propensa a demoras porque depende de las disponibilidad del jefe de ingeniería y de su buen manejo de tiempo para poder cumplir con el resto de sus

obligaciones. Además, se debe considerar las micro-interrupciones por parte de otros empleados que un jefe comúnmente tiene.

El punto (3) del proceso de asignación presenta una potencial falla. El modelador debe registrar las tareas que le fueron asignadas por el jefe de ingeniería en el control de ingeniería. Si no lo hace a tiempo el jefe de ingeniería podría volver a asignar esa tarea a otro modelador, ya que, el estado de la tarea en el control seguiría saliendo como “Sin Asignar”. Como consecuencia, se gasta tiempo y recursos en corregir estos errores cuando se dan y como mencionamos previamente, el tiempo perdido en la empresa se puede traducir en envíos tardíos.

Por último, en el punto (4) se ve una ineficiencia del proceso. Cada vez que un modelador termina de hacer las tareas que le fueron asignadas notifica al coordinador. El tiempo entre que el modelador termina de realizar sus tareas y el jefe de ingeniería le vuelve a asignar más es tiempo muerto.

En conclusión, el proceso AS-IS de asignación de tareas presenta muchas oportunidades de mejora. Es por eso que un rediseño en el proceso es importante para tener un impacto positivo en la cantidad de envíos tardíos a planta. Se propone la implementación de un algoritmo que automatice las interacciones manuales que el jefe de ingeniería deben hacer dentro de este proceso y además ayude a resolver los puntos mencionados anteriormente.

La empresa actualmente se encuentra en un crecimiento exponencial. En el 2017 eran un área dentro de Aceros Arequipa de 10 empleados, para el 2018 se convirtieron en TSC Innovation y la planilla incrementó a 50 empleados. El proceso de asignación, como comenta el jefe de ingeniería, ha pasado a ser un dolor de cabeza por qué llamar a cada modelador para asignarle tareas le toma mucho tiempo, es muy subjetivo y propenso a errores dejando una oportunidad de optimización. La empresa se proyecta a seguir creciendo por lo que quiere digitalizar el proceso para poder considerar todos los criterios a la hora de asignar tareas. Un rediseño del proceso de asignación de tareas reduciría el

tiempo de asignación, liberaría tiempo del jefe de ingeniería y optimizaría el tiempo de finalización mejor que los ratios teóricos.

2.4. Algoritmos y enfoques para la asignación de tareas

Como se ha logrado observar, TSC Innovation tiene un claro problema para asignar tareas. Es por ello, que se investiga el enfoque del problema *Unrelated Parallel Machine Scheduling* y *Job Assignment* para definir un objetivo y encontrar una lógica de un algoritmo que ayude a solucionar este problema.

Se ha dividido la solución en dos partes. La primera es definir el criterio de asignación, en este caso el retraso de las tareas asignadas. En la literatura este objetivo se conoce cómo “Minimizing total tardiness” y es presentado por los problemas de Unrelated Parallel Machine Scheduling. La segunda parte es la lógica de asignación del algoritmo y se ha consultado la literatura de los problemas de Job Assignment para definir los pasos de asignación.

2.4.1. Job Assignment Problem

El *Job Assignment Problem* es uno de los problemas de optimización más conocidos y consiste en asignar un conjunto de tareas ($t \in \{1, \dots, m\}$) a un conjunto de empleados ($p \in \{1, \dots, n\}$). Cada persona incurre en un costo al realizar cada tarea (t) y se requiere realizar todas las tareas minimizando el costo total de la asignación (1) (Tairiri, 2013). En este caso, el costo de la asignación se traduce como tiempo total de la realización de las tareas. Por ende, la formulación sería la siguiente:

$$\text{minimizar } \max \sum_{p=1}^n x_{pj} t_{pj}, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (1)$$

S.a.:

$$\sum_{p=1}^n x_{pj} \leq 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{pj} = 1, \quad \forall p \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

Donde:

j es un conjunto de m tareas

p es un conjunto de n empleados

$x_{pj} = 1$ si el empleado p es asignado a la tarea j

0 sino

La función objetivo del *Simple Job Assignment Problem* (1) busca minimizar el tiempo de realización de la tarea que toma mayor tiempo en realizarse. La variable x_{pj} toma el valor de uno cuando a un empleado p se le asigna una tarea j y de lo contrario toma el valor de cero. Al tomar el valor de uno se considera el tiempo de realización de una tarea j . Por otra parte, el problema de *Simple Job Assignment* cuenta con dos restricciones. Las restricciones establecen que una tarea sea realizada sólo por una persona y garantizan que un empleado sea asignado a solo una tarea.

Como se ha mencionado el *Job Assignment Problem* se puede dividir en dos variantes, dependiendo de las restricciones del problema [13]:

1. *Single Job*: utilizado cuando la cantidad de tareas es superior a la cantidad de empleados. Su restricción principal es que solo se puede asignar una tarea a cada persona.
2. *Multiple Jobs*: utilizado cuando la cantidad de tareas es superior a la cantidad de empleados. A diferencia del *Single Job* la restricción de la cantidad de tareas por persona (3) se elimina. Esto le permite al algoritmo asignar dos tareas a una misma persona si esta va a ser terminada antes de lo que le tomaría a otro empleado realizarla.

En [13] ponen a prueba el enfoque *branch and bound* y un método heurístico para resolver el problema de *Jobs Assignment*. Los resultados de la investigación dieron a conocer que el método de *branch and bound* tiene un mejor resultado que el método heurístico el 53% de las veces pero el gap de optimalidad es menor al 5% en el 82% de los casos [13]. Si bien el método heurístico no ofrece la solución óptima, puede brindar a la investigación un resultado lo suficientemente bueno con poco esfuerzo matemático y en poco tiempo. Lo cual se alinea con los requerimientos de la empresa como anteriormente se ha mencionado.

El algoritmo de la solución heurística propuesto en [13] sigue los siguientes pasos:

1. Inicialización:
 - 1.1. $\forall p \in \{1, \dots, n\}$ establecer la carga laboral del trabajador (y_p) a 0.
 - 1.2. Establecer el conjunto de actividades sin asignar $A = \{1, 2, \dots, m\}$
 - 1.3. Establecer el conjunto de actividades asignadas $B = \emptyset$
2. Ejecución
 - 2.1. $\forall j \in \{1, \dots, m\}$, si el conjunto A está vacío parar y el resultado de la función objetivo se calcula como el $y^* = \max_{p \in \{1, 2, \dots, n\}} y_p$
 - 2.2. $\forall p \in \{1, \dots, n\}$ establecer $s(p) \in A$, donde $s(p)$ es la tarea que le toma menos tiempo realizar al empleado p y se calcula como $y_p + t_{p,s(p)} = \min_{j \in A} (y_p + t_{p,j})$.
 - 2.3. Establece $p^* \in \{1, 2, \dots, n\}$ donde $(p^*, s(p^*))$ representa a la persona que se va a demorar menos en realizar la tarea, $s(p)$: $y_{p^*} + t_{p^*,s(p^*)} = \min_{p \in \{1, \dots, n\}} (y_p + t_{p,s(p)})$.
 - 2.4. Procede a asignar la tarea $s(p^*)$ al empleado p^* .
 - 2.5. Elimina la tarea $s(p^*)$ del conjunto A.
 - 2.6. Incluye en el conjunto B la tarea $s(p^*)$.
 - 2.7. Establece la nueva carga laboral del empleado a: $y_{p^*} = y_{p^*} + t_{p^*,s(p^*)}$
 - 2.8. Regresa al paso 2.1.

2.4.2. Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem (UPM)

El *Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem* es un problema NP-difícil que consiste en asignar, sin preferencia, un conjunto de tareas ($t \in \{1, \dots, m\}$) a un conjunto de empleados ($p \in \{1, \dots, n\}$). Contar con máquinas no relacionadas significa que el tiempo de realización de las tareas asignadas depende únicamente de cada máquina. El objetivo del problema presentado es el siguiente [14]:

$$\text{minimizar } \sum_{j=1}^m \max \{0, C_j - d_j\}$$

Donde: j es un conjunto de m tareas

C_j = el tiempo de realización de una tarea j

d_j = es la fecha de entrega de la tarea j

Sujeto a:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

$$i \neq j$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ihk} - \sum_{j=0}^n x_{hjk} = 0, \quad \forall h \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, m\} \quad (2)$$

$$i \neq h \quad j \neq h$$

$$C_j \geq C_i + \sum_{k=1}^m x_{ijk} \cdot (s_{ijk} + p_{jk}) + M \cdot (\sum_{k=1}^m x_{ijk} - 1), \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in \{1, \dots, m\} \quad (4)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, m\} \quad (5)$$

$$C_0 = 0 \quad (6)$$

$$C_j \geq 0, \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (7)$$

Parámetros:

d_j = fecha límite de la tarea j

p_{jk} = tiempo de procesamiento de la tarea j en la máquina k

s_{ijk} = tiempo de setup para procesar la tarea j después de la tarea i en la máquina k (s_{0jk} denota el tiempo de setup para procesar la tarea j primero en la máquina k)

C_j = tiempo de realización de tarea j

M = número positivo grande

Variable de decisión:

$x_{ijk} = 1$ si la tarea j es procesada después de la tarea i en la máquina k y 0 en caso contrario

Esta función objetivo se entiende como la minimización del retraso total de las tareas. Este retraso depende de las variables de decisión C_j y d_j y de la asignación de las tareas a los empleados. Se entiende que las máquinas pueden procesar solo una tarea a la vez y una vez que comienzan una tarea deben acabarla. Además, se asume que todas las tareas asignadas están disponibles en el tiempo 0 y que los datos de tiempos de realización, fechas de entrega, tiempos de setup son dados de antemano.

Se asignan las tareas a través de un algoritmo “greedy” que asigna iterativamente cada tarea al empleado que la haga más rápido. Optimizando cada iteración se obtiene, generalmente un óptimo local, no una solución óptima. Para mejorar esta asignación Lee, Yu & Lee [14] proponen un método de *Tabu Search* para generar vecindades llamadas *swap-based neighbourhoods*.

2.4.3. Aplicación en TSC Innovation

Para la elaboración de la solución de los problemas presentes en TSC Innovation se tomaron los dos enfoques encontrados en la literatura y se adaptaron a la situación actual de la empresa. El objetivo de la tesis se traduce al mismo objetivo que presenta el problema de UPM: la minimización del retraso total de las tareas.

Lee, Yu & Lee [14] muestra que el tiempo de asignación de su algoritmo con *tabu search* es de 2 minutos para 8 máquinas y 90 trabajos. Al traducir ese algoritmo al caso de TSC Innovation, en el que se tiene 45 trabajadores y más de 500 tareas, se considera que no es viable por la alta duración de la asignación. Debido que, a ese tiempo de asignación se le debe sumar el tiempo que el algoritmo se demora en estimar el tiempo de realización de las tareas por cada empleado.

Al ver que la empresa cuenta con un mayor número de tareas que de empleados, se toma en consideración el algoritmo propuesto por Chauvet et al [13] para resolver un Multiple Job Assignment problem.

Basándonos en las conclusiones de Chauvet et al [13] el enfoque heurístico presenta una solución lo suficientemente cercana a la óptima para el problema del *Multiple Job Assignment* como se demostró en la sección 2.4.1. Teniendo esto en cuenta, el enfoque dado a la solución del problema de asignación de tareas en TSC Innovation partirá de encontrar una solución heurística.

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

TSC Innovation (Tecnología y Soluciones Constructivas S.A.C) es parte de la Corporación Aceros Arequipa S.A. desde el 10 de Octubre del 2018. Está enfocada en brindar servicios de modelado estructural de barras de acero para el sector construcción. Tiene clientes en seis países diferentes y a participado en más de 100 obras, por ejemplo: el Banco Europeo (Luxemburgo), el Aeropuerto Arturo Merino Benítez (Santiago de Chile), la Universidad UTEC, el Viaducto de Armendariz, el tren eléctrico de Lima, entre muchas otras.

Es de las pocas empresas en Perú que cuentan con profesionales capacitados por la universidad Stanford en el programa de VDC (Virtual Design Construction). La misión de la empresa es industrializar el sector de la construcción, que como ha sido mencionado anteriormente (capítulo 1) es de los sectores menos productivos en el mundo. Uno de los pilares de la industrialización es el uso de nuevas tecnologías como: la inteligencia artificial para optimizar el trabajo en oficina o la utilización de prearmados de acero para aumentar la productividad en campo. Actualmente TSC Innovation junto con Aceros Arequipa se encuentran impulsando las tecnologías mencionadas anteriormente.

La empresa cuenta con dos áreas: I+D, en la que tienen a 5 empleados y se encargan de proyectos de innovación para la corporación, y el área de ingeniería de detalle, que cuenta con 44 modeladores, diseñadores y dibujantes a tiempo completo. El área de ingeniería de detalle trabaja directamente en el giro de negocio de TSC Innovation, que es el modelado estructural. Para las actividades de dibujo, posterior a la de modelado, la empresa además de tener a dibujantes tiene acceso a una empresa tercera en caso necesite mayor capacidad, pero para el caso del modelado no se tiene esa oportunidad. Es por ello que la empresa está muy interesada en mejorar el uso de su capacidad y alineado a su misión realizarlo transformando digitalmente sus procesos.

METODOLOGÍA

Como se ha mencionado previamente, el objetivo de esta tesis es reducir los envíos tardíos a planta a través de la mejora del proceso de asignación de tareas de los empleados de la empresa. Esto tendrá como resultado la disminución en el número de incidencias de dos factores:

- Demoras en diseño
- La cantidad de errores en diseño enviados a planta

En la sección 1.4. se habló de las demoras en diseño que comprenden el 27.94% del total de urgencias y el error en diseño el 8.87% Fig 1.4. Si se automatiza el proceso de asignación de tareas se espera que el porcentaje de demoras en diseño disminuyan. Esto se debe a una reducción en interacciones manuales del jefe de ingeniería con el proceso de asignación de tareas.

4.1 Rediseño

4.1.1 Proceso TO-BE

La implementación del algoritmo asignador de tareas, Anexo 1, implica un rediseño del proceso de asignación de tareas actual de TSC Innovation. Con esta mejora implementada el proceso se vería de la siguiente manera:

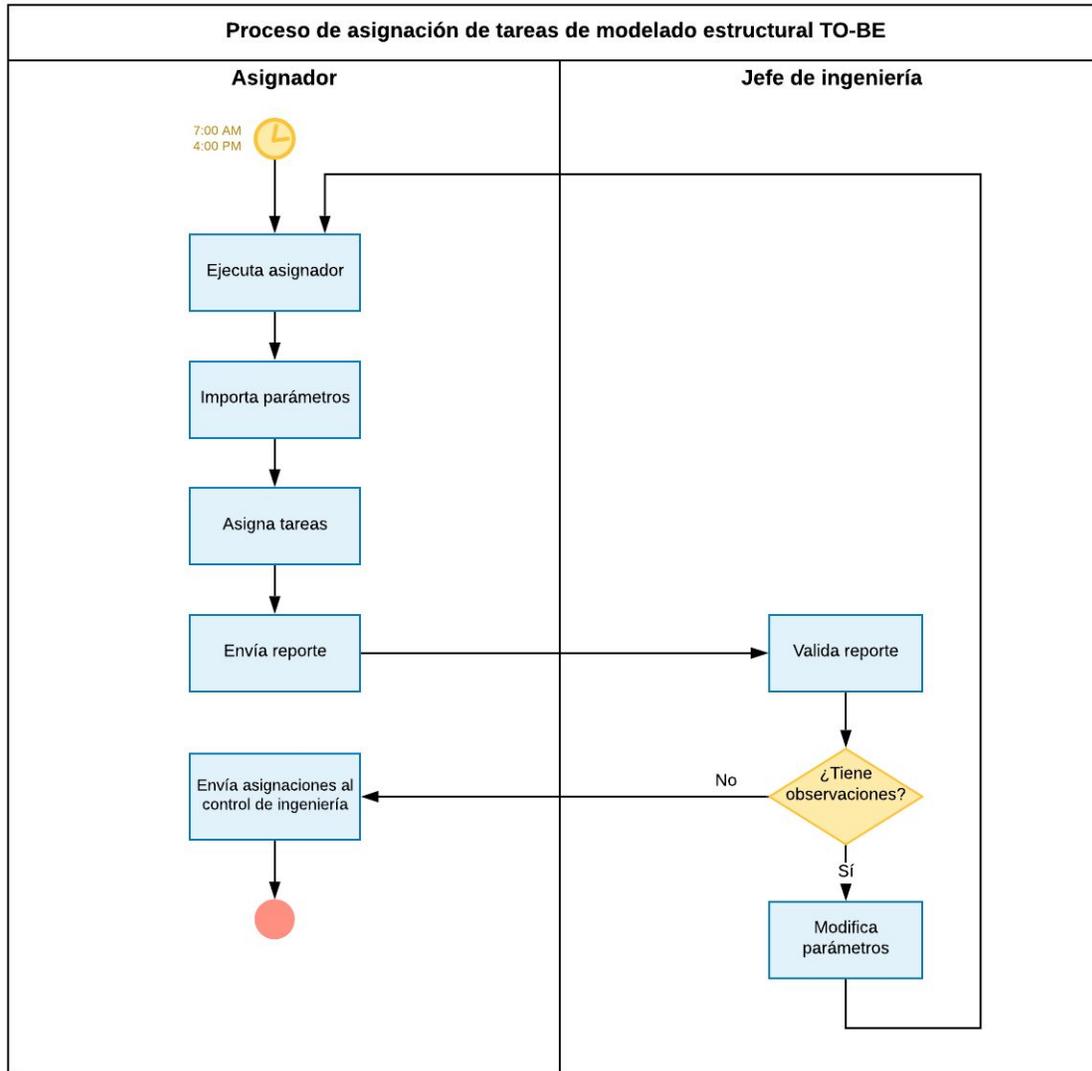


Figura 4.1: Proceso de asignación de tareas TO-BE

Fuente: Propia

A diferencia del proceso AS-IS, el proceso TO-BE elimina el seguimiento del coordinador, la notificación y tiempo muerto del modelador y el largo proceso de asignación que hace el jefe de ingeniería. El asignador revisa el banco de tareas por asignar dos veces al día a las 7.30am y 4.00pm para así reducir el tiempo que una tarea pasa en el banco de tareas antes de ser asignada. Esto ayuda a la empresa a gestionar mejor sus

urgencias al atender las tareas más rápido y así darle más tiempo de modelamiento a los empleados.

Las interacciones del jefe de ingeniería se disminuyen a únicamente la validación del reporte de asignación del algoritmo. Si el jefe de ingeniería tiene observaciones sobre el reporte, puede modificar la relación tarea-empleado que el algoritmo crea. Luego, el mismo algoritmo envía las tareas asignadas al control de ingeniería donde cada modelador puede ver qué tarea le fue asignada.

La lógica que el algoritmo sigue para asignar tareas es la siguiente:

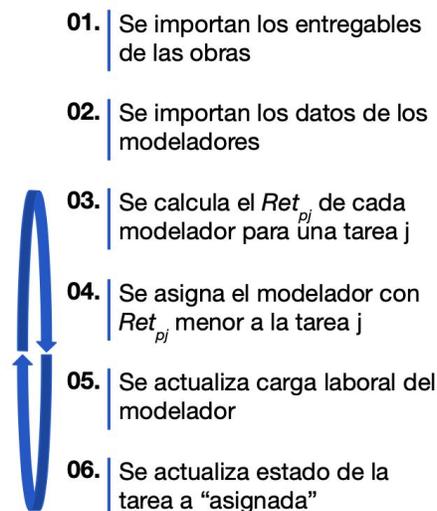


Figura 4.2: Lógica introductoria del algoritmo asignador

Fuente: Propia

4.2 Pronóstico del retraso (Ret_{pj})

4.2.1 Variable de decisión

Como podemos observar en la Fig 4.2 el algoritmo planteado asigna tareas utilizando como criterio el retraso (Ret_{pj}), donde “ p ” es la persona o modelador y “ j ” es la tarea a asignar. Utilizando este criterio de decisión se asignan las tareas con el objetivo de

minimizar la suma total de retrasos de las tareas. El propósito del algoritmo es decidir a qué persona, dentro de un conjunto de empleados, debe asignarle una tarea para que esta se termine en un tiempo mínimo y así prevenir demoras en diseño o retrasos.

4.2.2 Parámetros

Los parámetros utilizados por el algoritmo buscan acercarse al criterio actual de decisión que utiliza la empresa para asignar tareas (sección 2.3.2.), estos son:

- Conjunto de personas trabajando actualmente en TSC Innovation
- Conjunto de tareas realizadas, en curso y por realizar
- Conjunto de estructuras
- Conjunto de proyectos
- Promedio del tiempo de modelado en horas hombre por tonelada por estructura
- Toneladas por estructura
- Tiempo de familiarización con el proyecto
 - Proyecto a asignar
 - Dificultad del proyecto
 - Experiencia
 - Responsabilidad
 - Proactividad
 - Criterio para diseñar
 - Conocimiento tecnológico
 - Experiencia en el sector
- Carga laboral actual de cada empleado

La relación de cada uno de estos parámetros con el cálculo del retraso se explica en la siguiente sección.

4.2.3 Lógica de Algoritmo

La función objetivo planteada es la siguiente:

$$\text{minimizar } \sum_{p=1}^n \max_{j \in \{1, \dots, m\}} \{0, x_{pj} * Ret_{pj}\}$$

Sujeto a:

$$\sum_{p=1}^n x_{pj} \leq 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

Donde: j pertenece a un conjunto de m tareas

p pertenece a un conjunto de n empleados

$x_{pj} = 1$ si el empleado p es asignado a la tarea j

0 sino

Ret_{pj} = Retraso del empleado p al terminar la tarea j

Para definir el retraso se propone la siguiente ecuación:

$$Ret_{pj} = (tiempo_j * disp_día_p) + t_{pj}$$

Donde: j pertenece a un conjunto de m tareas

p pertenece a un conjunto de n empleados

$tiempo_j$ = Fecha requerida de la tarea j - Fecha de ejecución del algoritmo

$disp_día_p$ = horas al día que el modelador p tiene disponible para trabajar

t_{pj} = tiempo que se demora un modelador p en hacer una tarea j

El parámetro $tiempo_j$ es el resultado de una resta que le otorga un símbolo negativo. Se escogió definir el tiempo entre la fecha de ejecución del algoritmo y la fecha requerida con un símbolo negativo para cumplir con el objetivo de minimizar la suma de retrasos de las tareas. Un retraso negativo se entiende como una tarea que ha sido entregada antes de la fecha requerida. Entonces, al multiplicar los días entre la fecha de asignación y la fecha requerida de la tarea por las horas disponibles al día para modelar de un modelador p se consigue el tiempo (en horas) desde la fecha de asignación hasta la fecha requerida. A este tiempo se le suma el t_{pj} para calcular si la tarea va a ser entregada a tiempo o con un retraso.

El cálculo del t_{pj} o el tiempo de realización de una tarea tiene tres partes:

$$t_{pj} = f(\underset{(1)}{y_p}, \quad \underset{(2)}{R_j, TN_j, Exp_p}, \quad \underset{(3)}{Proj_{pjd}})$$

- y_p : acumulado de tiempos de tareas ya asignadas al empleado p
- R_j : ratio de horas hombre por tonelada de la estructura a la que pertenece la tarea j
- TN_j : Toneladas de la tarea j
- Exp_p : Factor de experiencia del empleado p
- $Proj_{pjd}$: Tiempo de familiarización de un empleado p con el proyecto de la tarea j de dificultad, d .

El primer término (1) es la carga laboral del modelador, el término (2) hace referencia al tiempo neto de realización de una tarea y el término (3) hace referencia al tiempo de familiarización previo que un empleado debe tener con una obra de cierta dificultad en la que no ha trabajado previamente.

Para calcular la variable t_{pj} se utilizó tres métodos. El primer método es una fórmula elaborada con los criterios de decisión utilizados actualmente por el jefe de ingeniería de detalle de la empresa TSC Innovation para asignar las tareas a los empleados de modelado. La ecuación es la siguiente:

$$t_{pj} = y_p + (R_j * TN_j), \quad \forall p \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

Toma en consideración únicamente las características de la tarea y los tiempos acumulados de tareas asignadas previamente. En el segundo método se utiliza la siguiente ecuación:

$$t_{pj} = y_p + (R_j * TN_j * Exp_p) + (N_{pj} * Proj_{pjd}), \quad \forall p \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

$N_{pj} = 1$ si el empleado p no ha trabajado antes en el proyecto de la tarea j

0 sino

En este segundo método, se toman en consideración las características de la tarea y las características del modelador. En contraste con el primer método, acá se incluye el factor de experiencia del modelador y el tiempo de familiarización con el proyecto.

El ratio, R_j , de horas hombre promedio por toneladas de una estructura es un parámetro que la empresa maneja desde que comenzó siendo un área en la Corporación Aceros Arequipa. Ellos la ajustan cada cierto tiempo en base a la estructura y al tipo de obra. Esta variable representa cuántas horas hombre una persona con experiencia 5 se demora en realizar una tonelada de una estructura determinada para un tipo de obra determinado. Por ello, la variable Exp_p multiplica al R_j . De esta manera, la variable Exp_p sirve como un factor de corrección que incrementa el tiempo de realización para un modelador con menor experiencia.

En el tercer método se define la variable del *tiempo neto de realización de una tarea* (2) con un modelo de regresión. Es decir, definimos la variable t_{pj} de la siguiente manera:

$$t_{pj} = y_p + F(TN_j, Exp_p, Estructura, Obra, Dificultad) + (N_{pj} * Proj_{pjd}),$$

$$\forall p \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

Donde el tiempo de realización de una tarea es una función de las variables ratio de horas hombre por tonelada, tonelada de una estructura, experiencia de un empleado y dificultad de la obra. Entonces, la diferencia entre los métodos de cálculo del t_{pj} viene en la forma de calcular el tiempo neto de realización de una tarea.

4.2.4 Solución: Algoritmo

Dada la rapidez de asignación requerida y la frecuencia de esta se ha optado por un método heurístico en vez de un método exacto. Para la presente investigación, se ha adaptado el método heurístico elaborado por Chauvet et al [13] presentado en la sección 2.4.1. a la situación actual de TSC Innovation para la resolución de este problema.

Se tomó la lógica de este algoritmo como inspiración para asignar las tareas en TSC Innovation. En vez de utilizar el t_{pj} como criterio de asignación usamos la variable creada Ret_{pj} . Se utilizaron las bases de datos de la empresa y se siguió la misma lógica del algoritmo para los tres métodos de asignación descritos previamente. La diferencia entre los métodos se encuentra en la metodología seguida para calcular los tiempo de realización de las tareas. La lógica adaptada al proceso de TSC viene a ser la siguiente:

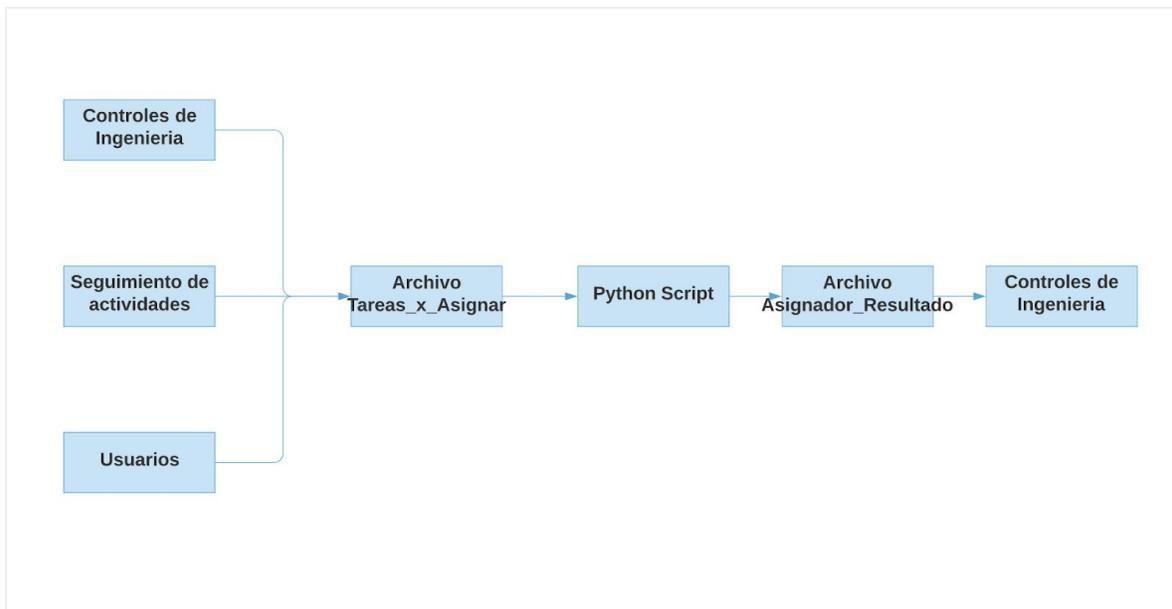


Figura 4.3: Flujo de Información

Fuente: Propia

El flujo de información que alimenta el algoritmo comienza con el registro de las obras de TSC Innovation en los controles de ingeniería. Este registro es hecho por los coordinadores de obra y sigue un formato estándar utilizado por la empresa. El registro consiste en desglosar los proyectos de construcción en entregables individuales, cada entregable requiere que se modele, diseñe y dibuje varias estructuras de acero que luego la fábrica de Aceros Arequipa producirá.

Luego, se corre un código en Google Apps Script que tiene como propósito consolidar las tareas o entregables pendientes para cada paso del proceso de ingeniería de detalle: modelado, diseño, dibujo. Estas tareas son consolidadas en un archivo llamado “Tareas_x_Asignar”.

En paralelo, se consolida información sobre los usuarios o empleados de TSC Innovation que trabajarán en las tareas previamente mencionadas. Se recopila información sobre disponibilidad de tiempo de producción, experiencia, carga laboral, etc. en una hoja del archivo “Tareas_x_asignar” llamada “Disponibilidad_Experiencia”.

Actualmente la empresa no tiene el plan de Google Suite para que el algoritmo en Python interactúe con Google Sheets por lo que las pruebas del algoritmo se realizan descargando el archivo de “Tareas_x_asignar”. El script en Python, Anexo 1, integra el flujo de información de tareas y usuarios. El objetivo del código en Python es estimar el tiempo de realización de una tarea para todos los empleados disponibles y asignar esa tarea al empleado que se demore el menor tiempo. Es decir, utiliza el tiempo de realización de una tarea como criterio de asignación. El flujo de la lógica de Python es el siguiente:

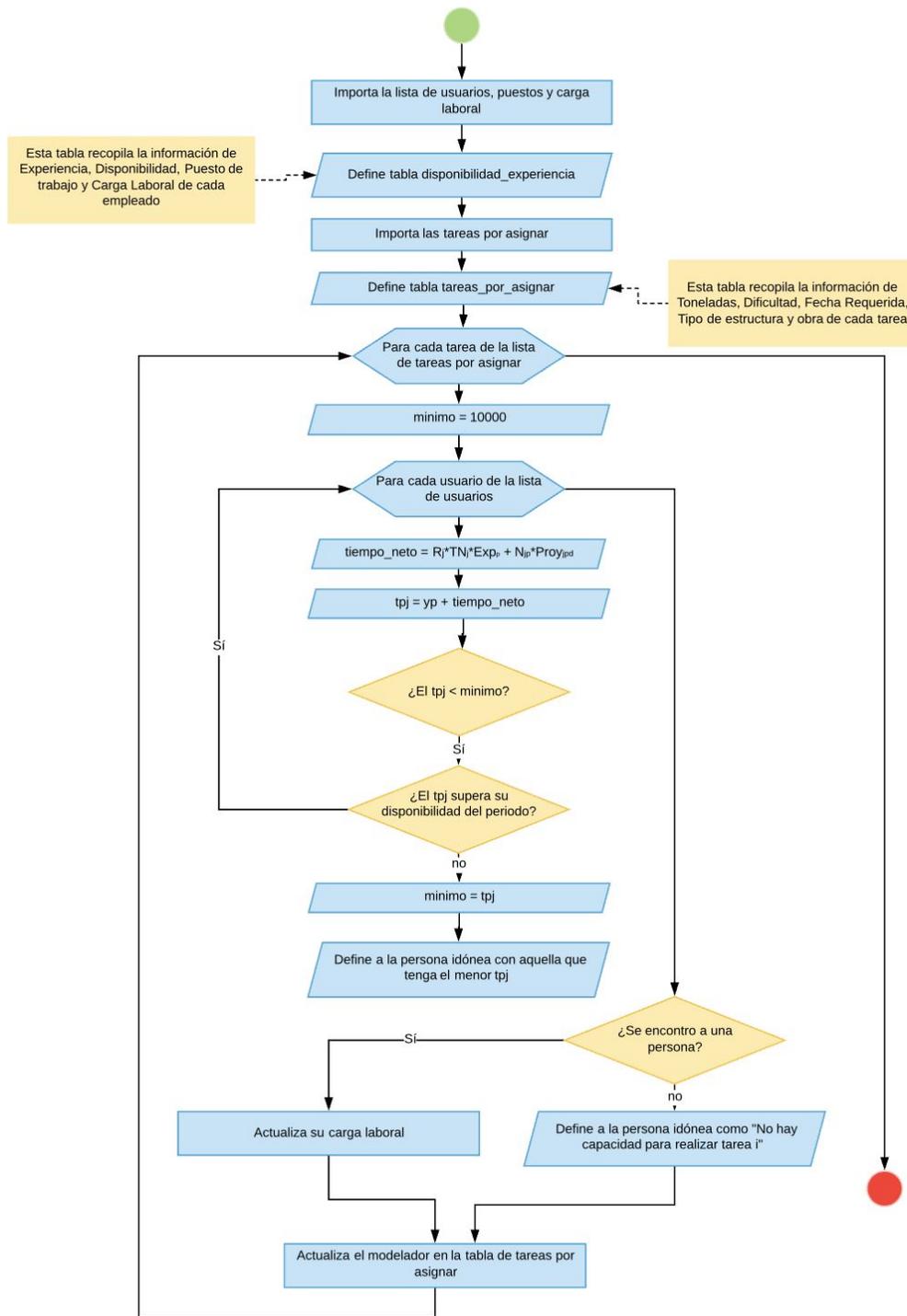


Figura 4.4: Flujo de lógica de algoritmo

Fuente: Propia

Una vez terminada la asignación el algoritmo exporta la información en formato Excel en un archivo llamado “Asignador_Resultado” para que el jefe de ingeniería lo revise y dé su visto bueno y por último este viaje a los controles de ingeniería.

4.3 Diseño de metodos de recoleccion de datos

Para poder realizar el cálculo del tiempo de realización de una tarea (t_{pi}) se necesita definir seis de los parámetros mencionados previamente con data recolectada. Estos parámetros son:

1. Ratios de tiempos de modelado en horas hombre por tonelada por estructura
2. Toneladas por estructura
3. Tiempo de familiarización con el proyecto
4. Experiencia
5. Carga laboral actual

Los parámetros 1 y 2 han sido definidos previamente por la empresa. Los ratios de tiempos de modelado en horas hombre por tonelada por estructura está basado en un cálculo realizado con la data histórica de la empresa y ha sido ajustado a través de los años con recolecciones de data realizada por el personal de la empresa, como se mencionó en la sección 3.4.. Las toneladas por estructura están definidas en el desglose de actividades requeridas de modelado y es data propia de cada estructura. El parámetro 5, la carga laboral actual, es una variable que se recalcula en cada iteración del algoritmo, ya que consiste en el tiempo de realización sumado de las tareas asignadas a cada modelador.

Sin embargo, existen dos parámetros que requieren de recolección de datos para ser definidos, estos son:

- Experiencia
- Tiempo de familiarización con el proyecto

El primer parámetro que para la recolección de datos es la experiencia de los modeladores, diseñadores y dibujantes. En todo proceso la experiencia tiene una relación inversa con el tiempo que se toma alguien en realizar una tarea. Para poder probar esto en TSC Innovation, se realizó un focus group acompañado de una encuesta para recolectar el tiempo que una muestra de modeladores se demora en realizar una tarea y la experiencia de cada uno de estos modeladores. Esta recolección de datos permite realizar una curva de aprendizaje para encontrar la relación entre el tiempo de realización de una tarea y la experiencia del modelador. Con estos resultados cuantificamos cuánto afecta la experiencia en el tiempo de realización.

Para definir el factor experiencia, el focus group tuvo como objetivo identificar cuales son las características que tiene un modelador experimentado que lo llevan a realizar una tarea sin errores². Con estos resultados, se procedió a realizar una encuesta donde los supervisores de los modeladores evaluaron cada característica para cada uno de los modeladores con los que han trabajado con una escala donde 1 es el valor más bajo para una determinada característica y 5 el valor más alto. Cada modelador fue evaluado dos veces por dos supervisores distintos para reducir la subjetividad de los resultados obtenidos. Las características evaluadas en la encuesta de experiencia fueron: responsabilidad, proactividad, criterio para diseñar, conocimiento tecnológico y experiencia en el sector. También, se recolectó información sobre la importancia que tiene cada una de las características de un modelador a través de la asignación de pesos, calificados como porcentajes. Los resultados de los pesos por característica fueron los siguientes: responsabilidad (20%), proactividad (20%), criterio para diseñar (30%), conocimiento tecnológico (15%) y experiencia en el sector (15%). Para determinar el nivel de experiencia

² Uno de los objetivos principales de esta investigación es reducir la cantidad de errores que se han enviado a producción. Es por ello que se pedirá que los criterios tomen en cuenta que el modelador ideal es aquel que hace una tarea en el menor tiempo pero sin errores.

cuantificado de cada modelador, se calculó un promedio ponderado de las calificaciones obtenidas por cada característica.

Una vez que se identificó el nivel de experiencia que cada modelador tiene se realizó una encuesta a los mismos modeladores evaluados previamente, utilizando Google Forms, para estimar sus tiempos de realización de una tarea. La empresa cuenta con 44 modeladores, diseñadores y dibujantes. Dentro de ellos 4 son practicantes, 10 son supervisores y 30 son analistas. Para la encuesta se tomó a la totalidad de ellos. Como se puede ver en el gráfico inferior se obtuvo a 12 personas con experiencia 5, 15 con experiencia 3 y 17 con experiencia 4. La falta de personas de experiencia 1 y 2, se atribuye a la coyuntura mundial del COVID-19. La empresa en el momento no se encontraba contratando desde hace 6 meses es por ello que los empleados ya se encuentran capacitados y califican dentro de las experiencias 3-4-5.

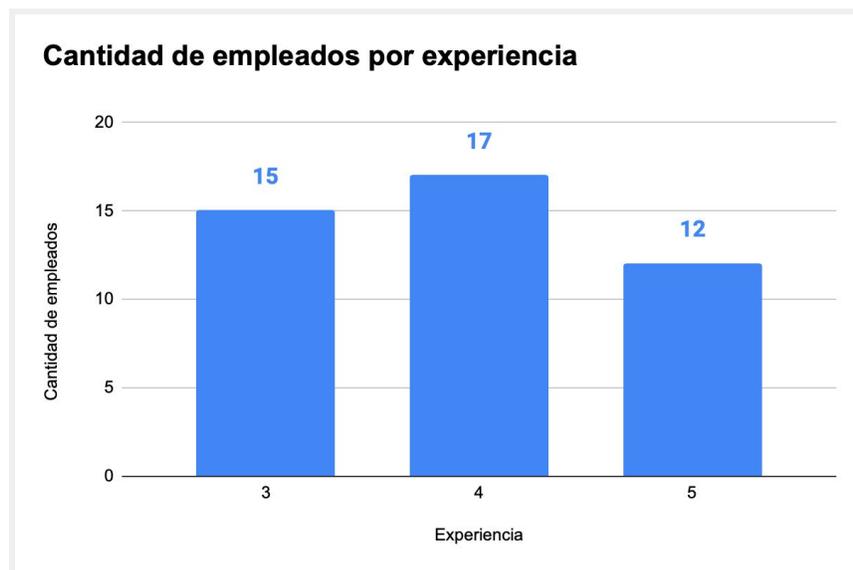


Figura 4.5: Distribución de empleados por experiencia

Fuente: Propia

La encuesta consistió en brindar información específica de distintas tareas para que el personal de la empresa, en base a su criterio, pueda estimar el tiempo que les tomaría

realizar cada una de esas tarea escogidas, este ejercicio se realizó para 30 tareas diferentes divididas en 5 obras de distintas dificultades. La encuesta estuvo dividida en tres secciones:

1. Familiarización con la obra
2. Tiempos estimados por estructura
3. Nivel de dificultad de las estructuras.

La primera sección brinda información para obtener el tiempo promedio que se demoraría un modelador, que no ha trabajado previamente en un proyecto de cierto nivel de dificultad, en familiarizarse con este. Es decir, nos ayuda a definir la variable *Proj_p*. La segunda, nos ayudó a recolectar el tiempo estimado de realización de una tarea de cada modelador. Esta data, junto con la encuesta de experiencia y focus group realizada a los coordinadores, nos ayudó a realizar la curva de aprendizaje mencionada anteriormente.

Una vez que se obtuvo la data del tiempo estimado de realización de proyecto y la experiencia de cada modelador, se analizó la relación que existe entre estas variables. Los resultados fueron los siguientes:

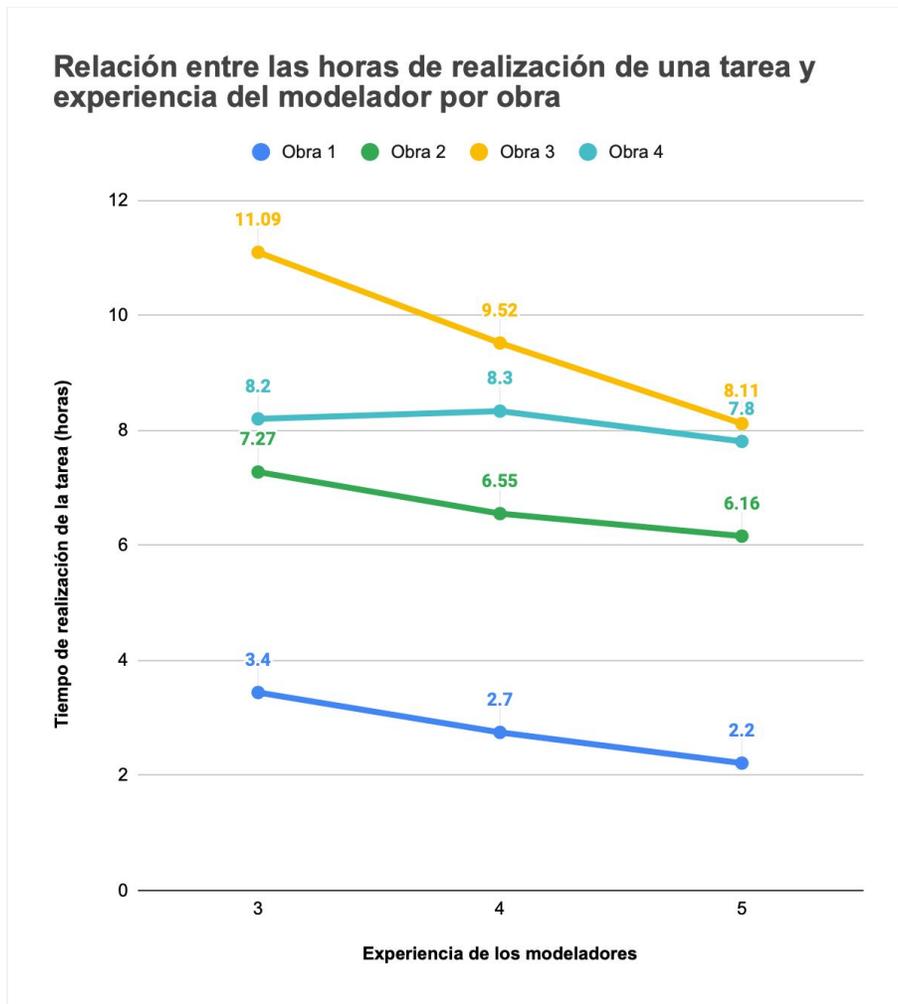


Figura 4.6: Relación entre tiempo neto de tarea y experiencia para cuatro obras

Fuente: Propia

Este gráfico muestra cómo afecta la experiencia en el tiempo de realización de una tarea por un modelador o dibujante. Podemos ver que para las obras que se utilizaron como ejemplo en la encuesta, el tiempo de realización de una tarea tiende a caer mientras mayor sea la experiencia del modelador / dibujante. Es decir, existe una relación inversamente proporcional entre la experiencia del personal de TSC Innovation y el tiempo de realización de una tarea.

Luego, analizamos el incremento en porcentajes de los tiempos promedios de realización de una tarea entre los distintos niveles de experiencia encontrados en la empresa para poder crear una curva de aprendizaje. El resultado de esta curva de aprendizaje fue la siguiente:

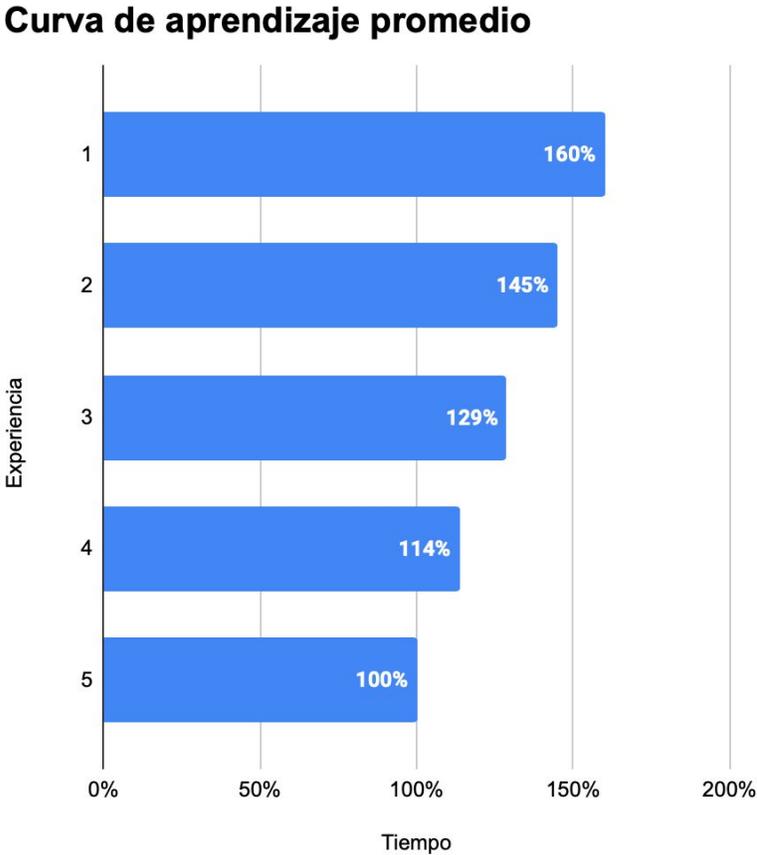


Figura 4.7: Curva de aprendizaje, relación entre experiencia y tiempo de realización de una tarea

Fuente: Propia

Para poder definir el factor experiencia en la fórmula de cálculo del t_{pj} , se calculó la variación del tiempo promedio de realización de una tarea entre los modeladores de distintas experiencias. Se definió un porcentaje de incremento entre los tiempos tomando como línea base el tiempo de los modeladores con experiencia 5. El tiempo que se demora

un modelador de experiencia 5 es igual al múltiplo de los ratios de hora hombre por tonelada, que varían dependiendo de la estructura, por la cantidad de toneladas que una estructura tiene. Como podemos observar se ve un incremento del 14% y 15% en el tiempo, para los trabajadores de experiencia 4 y 3 respectivamente, con respecto al tiempo de los modeladores con experiencia 5 . Debido a que se encontró que el incremento entre tiempos fue similar, se asume que esta tendencia continúa para los modeladores de experiencia 2 y 1. Como la empresa no cuenta actualmente con modeladores de experiencia baja, pero es probable que en algún momento sí lo haga, se tomó estos supuestos.

Por último, la tercera sección define el factor dificultad (D_j) que multiplica al tiempo de familiarización de un modelador con un proyecto de una cierta dificultad.

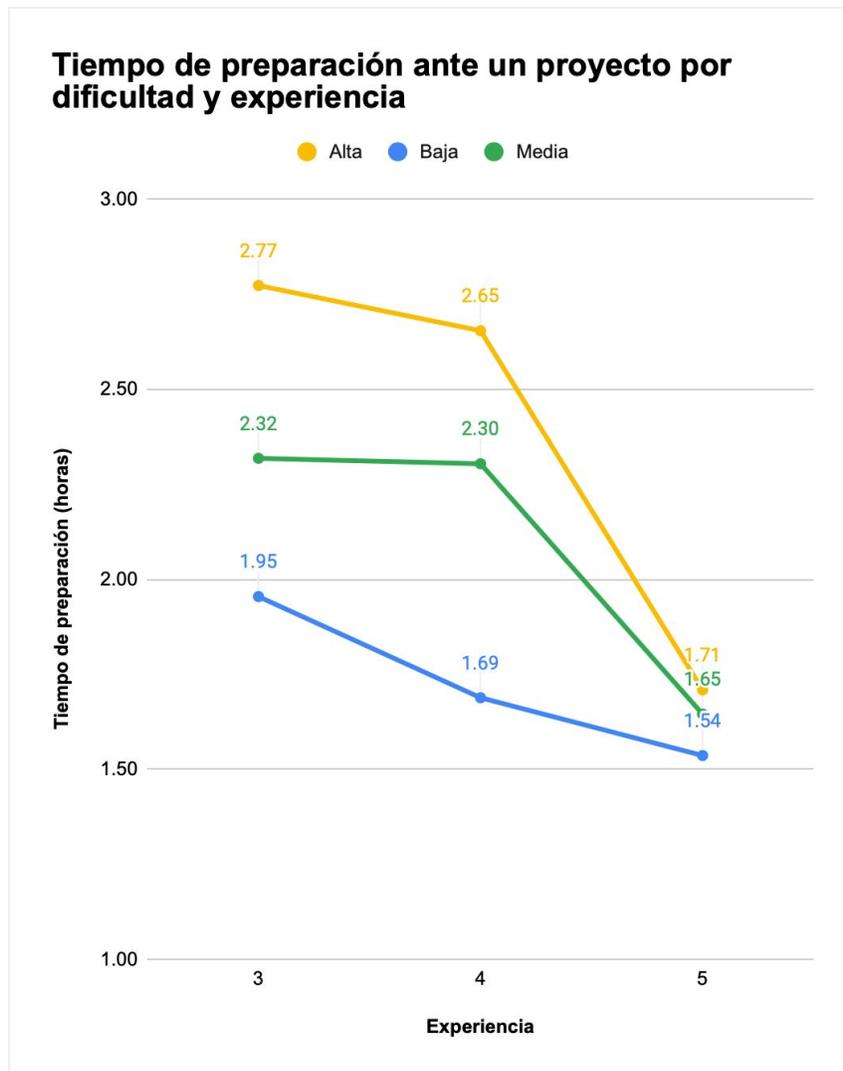


Figura 4.8: Relación entre dificultad y tiempo de familiarización con un proyecto

Fuente: Propia

Como podemos observar en el gráfico superior se ve una relación entre la dificultad de la obra y el tiempo de familiarización de un empleado con el proyecto. Se ve que mientras mayor sea la dificultad de la obra, mayor es el tiempo promedio de familiarización con el proyecto, para todos los modeladores de distintos niveles de experiencia. Este es un hallazgo coherente, al tener en cuenta que una obra de dificultad alta es un proyecto minero

que tiene muchas especificaciones y estándares que seguir, y una obra de dificultad baja es un edificio residencial.

Dificultad	Experiencia	Tiempo	Porcentaje
Baja	3	1,95	127%
	4	1,65	107%
	5	1,54	100%
Media	3	2,32	141%
	4	2,3	139%
	5	1,65	100%
Alta	3	2,77	162%
	4	2,65	155%
	5	1,71	100%

Tabla 4.1: Datos de dificultad de una obra, tiempo de familiarización y porcentaje de variación de tiempo

Fuente: Propia

Se recolectaron los tiempos estimados por estructura con el propósito de encontrar la relación que estos tienen con las variables previamente mencionadas y para validar la precisión de la estimación del t_{pj} por los tres métodos de cálculo. Dentro de los tres métodos utilizados para calcular el t_{pj} se definió que el método tres era el que brindaba el cálculo más confiable al utilizar un modelo de regresión para definir la relación entre las variables del tiempo neto de realización. Es por eso, que se quiso validar el modelo de regresión construido (método tres) con la data de los tiempos estimados.

RESULTADOS

Al momento de comparar la estimación de tiempos del modelo de regresión con el tiempo estimado recolectado en las entrevistas, los resultados fueron los siguientes:

```
Call:
lm(formula = Tiempo ~ Exp + Tarea + Dificultad.Obra + Tip.Obr,
    data = modelado)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-8.373 -3.477 -1.169  1.823 42.773

Coefficients: (1 not defined because of singularities)
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   10.3280     0.8828  11.699 < 2e-16 ***
Exp4          -0.8581     0.5354  -1.603 0.109417
Exp5          -1.1009     0.5570  -1.976 0.048513 *
TareaCobertura  0.4504     0.6449  0.698 0.485209
TareaLosas     5.8419     0.9915  5.892 5.96e-09 ***
TareaMuro     -2.2657     0.9547  -2.373 0.017908 *
TareaPortante  0.5170     0.9119  0.567 0.570962
TareaPortantes 0.3003     0.7677  0.391 0.695776
Dificultad.ObraBaja -2.7952  0.8109  -3.447 0.000601 ***
Dificultad.ObraMedia -1.4591  0.6396  -2.281 0.022834 *
Tip.ObrED.CO   -5.4384     0.6592  -8.250 8.03e-16 ***
Tip.ObrED.VI   NA           NA       NA       NA
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.827 on 689 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1904,    Adjusted R-squared:  0.1787
F-statistic: 16.21 on 10 and 689 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 5.1: Resultados de regresión lineal con la recolección de datos 1

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos nos indican que existen variables no significativas al tener un *p-value* menor a 0.05. También, vemos que las variables consideradas sólo explican el 17.8% del tiempo estimado (valor del *R-squared*). El error en el pronóstico del tiempo neto de realización del modelo de regresión en comparación con los tiempos recolectados es de 5.8 horas, el cual es un error muy alto tomando en consideración que es un factor importante en el cálculo del retraso.

Se concluyó que la razón detrás de los malos resultados mencionados previamente fue la manera en la que se recolectó la data. Se cree que la recolección de estimaciones de tiempos por parte de los modeladores fue una manera subjetiva de recolectar datos. Por ende, se procedió a realizar una segunda recolección de data, en donde se controló la subjetividad de la data al usar una herramienta de control. En esta herramienta los modeladores podían ver las tareas que tenían agendadas y se les pidió que presionen un botón a la hora de comenzar a trabajar en una tarea. Apenas se apretaba el botón, la herramienta comenzaba el conteo de tiempo de realización y no detenía la cuenta hasta que el modelador le ponga pausa o fin a la tarea. Se indicó que el botón de pausa se debía presionar cada vez que se dejaba de trabajar en la tarea por cualquier motivo y el botón de fin únicamente cuando se haya culminado la tarea. Esta herramienta era controlada por el jefe de ingeniería de detalle y únicamente él podía modificar los tiempos finales recolectados. De esta manera, se consiguió recolectar data objetiva de los tiempos netos de realización de las tareas. Luego, se procedió a comparar esta nueva recolección de data con el modelo de regresión para validarlo. Los resultados fueron los siguientes:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	12.83655	10.12849	1.267	0.206497	
ExpExp_3	13.64303	2.11179	6.460	7.78e-10	***
ExpExp_4	7.00670	1.65950	4.222	3.67e-05	***
Peso	0.15743	0.04699	3.351	0.000964	***
Tipo.de.Diseño2D	-12.10000	9.55237	-1.267	0.206735	
Tipo.de.DiseñoBIM	-10.22035	9.54167	-1.071	0.285403	
Tipo.de.DiseñoPRE	-11.63298	9.90663	-1.174	0.241687	
Tipo.de.ObraCI.MI	1.25081	2.80634	0.446	0.656289	
Tipo.de.ObraCI.OT	-0.69359	3.50748	-0.198	0.843444	
Tipo.de.ObraCI.VI	2.35413	4.18466	0.563	0.574364	
Tipo.de.ObraED.CO	4.06108	3.18914	1.273	0.204351	
Tipo.de.ObraED.VI	1.63207	3.25430	0.502	0.616563	
EstructuraFundacion	-8.48717	9.83799	-0.863	0.389340	
EstructuraLosas	0.75149	2.71670	0.277	0.782358	
EstructuraMuros	1.01618	3.26002	0.312	0.755587	
EstructuraPedestal	-2.12475	3.23434	-0.657	0.511978	
EstructuraPlaca	3.84194	3.29279	1.167	0.244691	
EstructuraViga	0.53752	2.56723	0.209	0.834367	
EstructuraVigas	-9.47158	10.26008	-0.923	0.357042	
EstructuraZapata	-2.77836	3.37953	-0.822	0.411990	

Residual standard error: 9.321 on 200 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.3498, Adjusted R-squared: 0.288
 F-statistic: 5.662 on 19 and 200 DF, p-value: 3.929e-11

Figura 5.2: Resultados de regresión lineal con la recolección de datos 2

Fuente: Elaboración propia

Al analizar estos resultados se observó que la mayoría de las variables en el modelo no eran significativas al tener un *p-value* elevado. Por otro lado, el *R-squared* mejoró a un 28.8%, pero aún así el error del modelo incrementó a 9.3 horas. Se decidió excluir variables para analizar únicamente las variables significativas en el modelo, los resultados fueron los siguientes:

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.39169    1.05853   4.149 4.81e-05 ***
ExpExp_3     12.82066    1.75302   7.313 5.02e-12 ***
ExpExp_4      6.09145    1.41671   4.300 2.59e-05 ***
Peso          0.15914    0.04342   3.665 0.000312 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 9.292 on 216 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.3021, Adjusted R-squared: 0.2924
F-statistic: 31.17 on 3 and 216 DF, p-value: < 2.2e-16

```

Figura 5.3: Resultados de regresión lineal con la recolección de datos 2 y excluyendo las variables no significativas

Fuente: Elaboración propia

Analizando la Fig 5.3 se concluyó que aunque las variables presentadas eran significativas el error seguía siendo muy grande como para optar por el método tres para el cálculo de t_{pj} . Se intentó probar la relación directamente proporcional que se encontró previamente entre el tiempo y experiencia con estos resultados, pero los resultados no fueron favorables. Ver Fig 5.4.

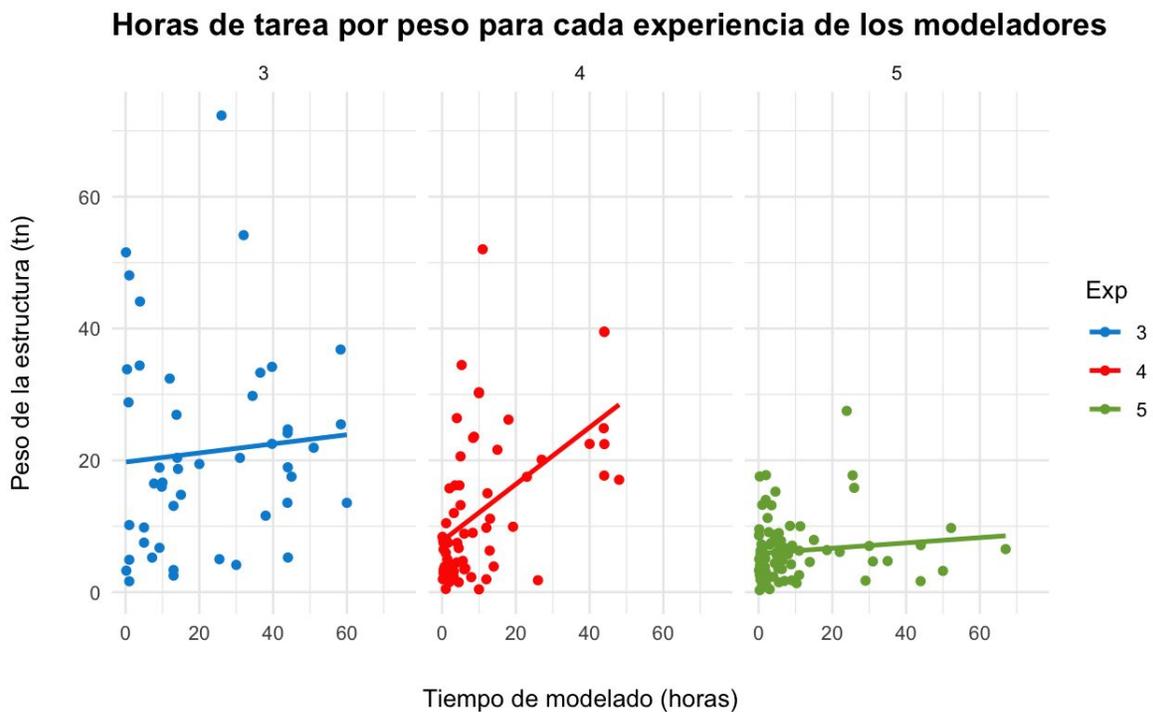


Figura 5.4: Horas de tarea por peso para cada experiencia de los modeladores

Fuente: Elaboración propia

5.1. Causas de la calidad de los resultados

Luego de haber concluido que el método tres no iba a ser una manera viable de calcular el tiempo neto de realización de una tarea, se procedió a averiguar por qué los resultados habían salido de esa manera.

Se realizó una investigación interna dentro de la empresa TSC Innovation en donde se encuestó a modeladores para entender cómo trabajaban y cómo utilizaban la herramienta de la segunda recolección de data. Las causas de malos resultados fueron las siguientes:

1. Mal uso de la herramienta de cálculo de tiempo.

2. Poco control sobre las condiciones laborales de los modeladores (ej, Wi-fi, ergonomía, ordenador utilizado, etc.)
3. Distracciones al estar trabajando desde casa (compras, familia, cocina, etc)
4. Dificultad de coordinación para simular escenarios de modelación bajo las mismas condiciones

Se identificó que existía una curva de aprendizaje a la hora de utilizar la herramienta nueva de la segunda recolección de data. En algunos casos, los modeladores no la usaron correctamente y esto causó una distorsión en la data recolectada. Hubo modeladores que no utilizaron el botón de pausa cuando dejaban de trabajar en una tarea y otros que se olvidaron de apretar el botón de fin. Esto hizo que la herramienta calcule tiempos incorrectos.

5.2. Elección del método para el cálculo del t_{pj}

Luego de analizar los resultados obtenidos por el método tres, se procedió a elegir el método más adecuado para el cálculo del t_{pj} .

Se descartó el método uno debido a que era el método que actualmente utilizaba la empresa para calcular el t_{pj} y no incluía las características propias del modelador y el método tres fue descartado por las razones explicadas previamente. Como consecuencia, se optó por elegir el método dos:

$$t_{pj} = y_p + (R_j * TN_j * Exp_p) + (N_{pj} * Proj_{pjd}), \quad \forall p \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, m\}$$

Este método incluye variables que afectan al tiempo de realización de una tarea como se indicó en la Sección 3.6.0. La experiencia y el tiempo de familiarización son variables significativas en relación al tiempo. Es por eso, que se optó por escoger un método en donde el cálculo del tiempo tenía un mayor sustento.

5.3. Impacto

Se procedió a simular el proceso de asignación de tareas TO-BE, el cual utiliza el cálculo del t_{pj} explicado por el método dos. Se simularon 200 instancias, con 45 empleados y un número de tareas distinto en cada uno y se recolectaron los tiempos. A continuación, se pueden observar los resultados de las simulaciones realizadas.

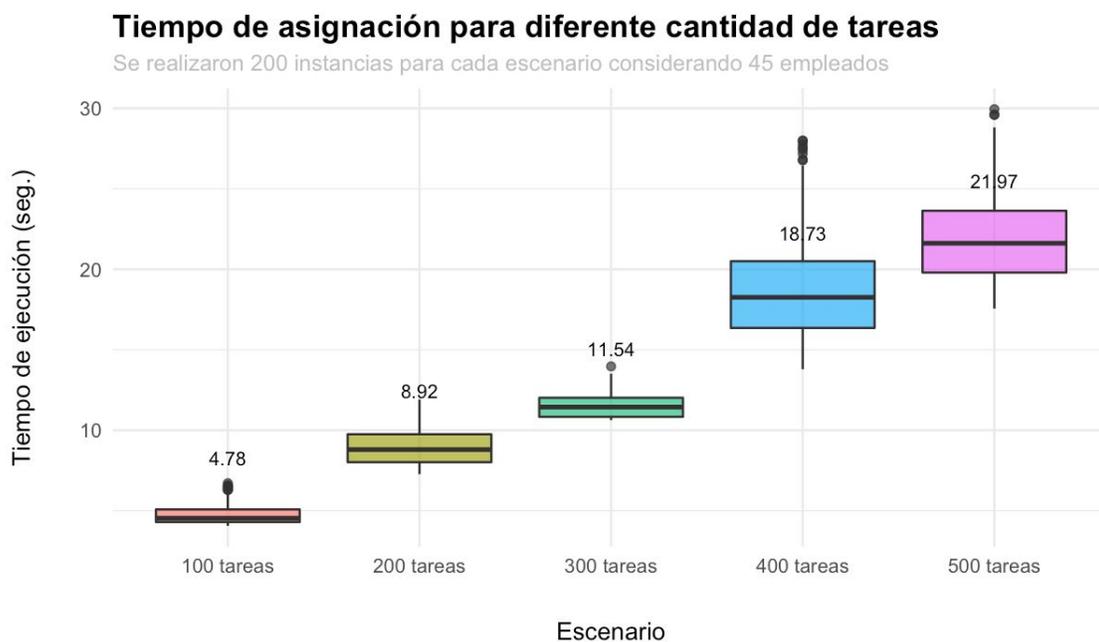


Figura 5.5: Simulaciones del algoritmo asignador de tareas

Fuente: Elaboración propia

El impacto que el rediseño del proceso de asignación de tareas tuvo en TSC Innovation fue el siguiente:

	Tiempo de ciclo (h)	Tiempo entre asignaciones (días)	Agentes (cant.)
AS - IS	4 - 5	7	3
TO - BE	0.25 - 0.50	0.5	1

Tabla 5.1: Métricas proceso AS-IS y TO-BE

Fuente: Elaboración propia

Vemos que la Tabla 5.1 y el Fig 4.1 (Proceso TO-BE) muestran el impacto que el rediseño del proceso tuvo. Se redujo el número de agentes en el proceso de tres a uno, el tiempo entre asignaciones pasó de 7 días a 0.5 días y el tiempo de ciclo se redujo de 4 - 5 horas en promedio a 0.25 - 0.50 horas en promedio. El algoritmo eliminó la mayoría de interacciones que debía hacer el jefe de ingeniería, como se ve en el gráfico N°04 (Proceso AS-IS), pero aún así el jefe de ingeniería debe revisar el reporte y validarlo, es por eso que el tiempo de ciclo del proceso TO-BE no es igual a alguno de los tiempos de las simulaciones del algoritmo.

Además, esta mejora en el proceso de asignación de tareas en TSC Innovation tiene otros beneficios. Al reducir el número de agentes en el proceso, el tiempo de gestión que estos gastan en el proceso de asignación puede ser utilizado para la producción de modelos. Es decir, pueden dedicar más horas al día a enfocarse en modelar y completar tareas. Los modeladores no dependen del jefe de ingeniería para tener carga laboral, el algoritmo se encarga de asignarles tareas constantemente. El hecho que el algoritmo asigne tareas dos veces al día asegura que las tareas no pasen 7 días sin ser atendidas y como consecuencia los modeladores tendrán más tiempo para modelar antes de la fecha requerida de las tareas.

Otro impacto del rediseño de este proceso es el incremento en la disponibilidad del jefe de ingeniería. Al reducir el número de interacciones que él debe hacer con el proceso de asignación de tareas tiene más tiempo libre para la gestión de la empresa.

DISCUSIONES

Como se describe en la sección 6.0 y 6.1, una limitación de la tesis fue la mala recolección de datos que se obtuvo. Con una buena recolección de datos se asume que se podría validar el método 3 para el pronóstico del t_{pj} . De esta manera, el proceso de asignación de tareas en TSC Innovation se mejoraría aún más. El proceso WHAT-IF sería el siguiente:

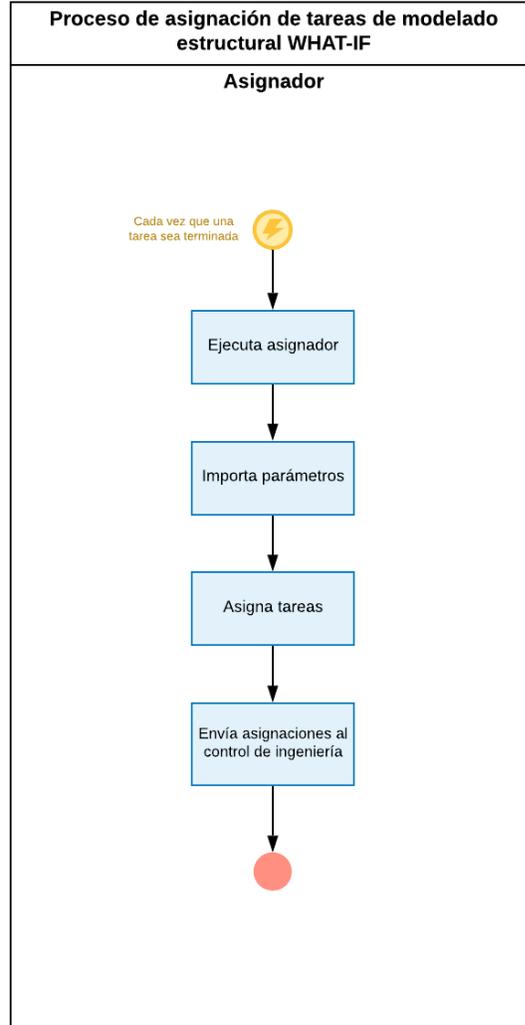


Figura 6.1: Proceso de asignación de tareas WHAT-IF

Fuente: Elaboración propia

Al validar el modelo de regresión que estima los tiempos de realización de tareas de cada modelador, se podrá remover al jefe de ingeniería del proceso al confiar que la estimación es lo suficientemente precisa para que no se requiera el proceso de validación de asignación. Como consecuencia, al no necesitar la validación del jefe de ingeniería el

asignador podrá correr cada vez que un modelador termine una tarea porque no existirá la limitante de tiempo que presenta el proceso de validación. Este incremento en la frecuencia de asignación tendrá como consecuencia una mejor gestión de urgencias por parte de la empresa, ya que, el tiempo que pasará una tarea en el banco de tareas por asignar será reducido.

Las métricas estimadas para el proceso WHAT-IF son las siguientes:

	Tiempo de ciclo (h)	Tiempo entre asignaciones (días)	Agentes (cant.)
AS - IS	4 - 5	7	3
TO - BE	0.25 - 0.50	0.5	1
WHAT-IF	0	Cada vez que una tarea se termina	0

Tabla 6.1: Métricas proceso AS-IS, TO-BE y WHAT-IF

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 6.1, las mejoras del proceso WHAT-IF son: una reducción en el número de agentes involucrados en el proceso de asignación de tareas y un incremento en la frecuencia de asignación. Como consecuencia de tener cero agentes involucrados en el proceso, el tiempo de ciclo de este también disminuye a cero. Esto se debe a que el tiempo de ciclo del proceso se entiende como la suma de tiempos que se demoran los agentes involucrados en el proceso en realizar sus actividades.

Otro cambio que se espera implementar en un futuro es la mejora de la asignación en sí realizada por el algoritmo, es decir el proceso de coincidir una tarea con un modelador. Se sabe que la manera de asignar a través de un algoritmo “*greedy*” tiene limitaciones para

encontrar una solución óptima por la alta probabilidad que la solución sea un óptimo local. Para mejorar la solución encontrada se planea implementar un algoritmo con *tabu search* para explorar el espacio de búsqueda y acercarse al óptimo global. Esta mejora se alinea al proceso WHAT-IF porque está sumando a la confiabilidad del algoritmo y ayuda a justificar aún más remover al jefe de ingeniería del proceso de asignación.

CONCLUSIONES

Luego de analizar los resultados y el impacto que tuvo la tesis en el proceso de asignación de tareas de la empresa, se puede concluir que se cumplió el objetivo general de la tesis hasta cierto punto. Los envíos tardíos a planta se reducirán ya que la asignación se realiza con mayor frecuencia y los pedidos especiales no se volverán urgencias.

Por otro lado, la identificación de los factores que afectan al tiempo estuvo limitada por la recolección de la data. Al momento de la investigación el mundo pasaba por la crisis del COVID-19 y los empleados se encontraban en sus casas, lo que impidió una recolección de datos con un grupo de control bajo un mismo escenario.

Otro de los objetivos específicos era el rediseño del proceso de asignación para reducir el tiempo de asignación de tareas dentro de TSC Innovation. Como se describió en la Sección 5.3 este objetivo se cumplió en su totalidad reduciendo el tiempo de ciclo del proceso de 4-5 horas a 0.25-0.5 horas logrando asignar tareas 10 veces a la semana en comparación de 1 vez a la semana.

De marzo a junio 2020 la planta de producción de Aceros Arequipa estuvo cerrada. Durante este periodo TSC Innovation siguió modelando estructuras y ahora tienen un stock de pedidos que, una vez que la fabricación se reanuda, enviará a producción. Debido a esto, actualmente no se puede medir el impacto de esta investigación en los envíos tardíos. Por eso, como se explicó en la sección anterior, se le recomienda a la empresa implementar el algoritmo desarrollado en esta investigación y ver el impacto que tiene en los envíos a planta cuando se regrese a la normalidad post COVID-19. En el caso que el algoritmo no ayude a reducir los envíos tardíos a planta por debajo de lo que la empresa quiere (5%) se le recomienda hacer una recolección de datos en oficina para implementar un algoritmo de machine learning con una estimación de tiempos precisa.

AGRADECIMIENTOS

Queremos dedicar esta tesis a todas las personas que nos apoyaron. Agradecemos a nuestro asesor Fabien Cornillier y al jefe de ingeniería de TSC Innovation, Alberto Ogata, por la dedicación, apoyo y paciencia que nos brindaron a lo largo de todo el proceso de tesis. Sin el apoyo de amigos y familia no habiéramos tenido la perseverancia necesaria para completarla. Nos demostraron que lo más importante **para la mente** es la colaboración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Garcia Zanabria, J., *Comportamiento De La Economía Peruana En El Tercer Trimestre De 2019*. Lima: INEI, 2019, p.9.
- [2] Kunz, J., & Fischer, M. , *Virtual design and construction: themes, case studies and implementation suggestions*. California, Estados Unidos: Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), Stanford University, 2009, pp. 2-19. [Online]. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.154.9655&rep=rep1&type=pdf>
- [3] Teicholz, P. *Labor productivity declines in the construction industry: causes and remedies*. Estados Unidos: AECbytes Viewpoint, 2013, pp. 1-2. [Online]. Disponible en: http://www.aecbytes.com/viewpoint/2013/issue_67.html
- [4] Saavedra, V., Ramos, Y., Maricruz, K., Agurto, A., Rivera, L. “*VDC: Importancia del modelo POP*”, Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017, pp. 1-10.
- [5] Azhar, S. “*Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry*”. Estados Unidos: Leadership and Management in Engineering, 2011, pp. 241-252. [Online]. Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29LM.1943-5630.0000127>
- [6] Barlish, K. & Sullivan, K. “*How to measure the benefits of BIM—A case study approach. Automation in construction*”, Arizona, Estados Unidos: Universidad de Arizona, 2012, pp. 149-159. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008>
- [7] Lymath, A., 2014. *The top five barriers to BIM implementation*. [Online]. Disponible en: <https://www.thenbs.com/knowledge/the-top-five-barriers-to-bim-implementation>
- [8] Ogata, A, *Ratios de productividad Pre-Covid*. Lima, Peru. TSC Innovation, 2019.
- [9] Fisk, E. R., & Reynolds, W. D. *Construction Project Administration*. Ohio, Estados Unidos: Prentice Hall, 2006, 10.
- [10] Schumacher, L. *Quantifying and Apportioning Delay on Construction Projects*. Cost engineering. Estados Unidos: American Association of Cost Engineers, 1995, pp.

11.

- [11] Marroquin, D. *APLICABILIDAD DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RETRASOS EN LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN NACIONALES*. Piura, Perú: Universidad De Piura, 2010, pp. 61-70. [Online]. Disponible en:
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1434/ICI_183.pdf?sequence=1
- [12] Mind Tools Content Team (n.d.) *Successful Delegation: Using the Power of Other People's Help*. [Online]. Disponible en:
https://www.mindtools.com/pages/article/newLDR_98.htm
- [13] Chauvet, F., Proth, J.-M. & Soumare, A. “*The simple and multiple job assignment problems*”. Francia: International Journal of Production Research, 2000, pp. 1-20.
- [14] Lee, J., Yu, J. & Lee, D. “*A tabu search algorithm for unrelated parallel machine scheduling with sequence- and machine-dependent setups: minimizing total tardiness*”. Londres: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, pp. 2-10. [Online]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/257337906_A_tabu_search_algorithm_for_unrelated_parallel_machine_scheduling_with_sequence_and_machine-dependent_setups_Minimizing_total_tardiness

ANEXOS

ANEXO 1: Código del algoritmo en Python

```
from __future__ import print_function
import os
import pandas as pd
from pprint import pprint
import numpy as np
from datetime import datetime
from openpyxl import Workbook
import xlswriter

pd.set_option('display.max_rows', 500)
pd.set_option('display.max_columns', 500)
pd.set_option('display.width', 1000)
np.set_printoptions(threshold=np.inf)

def disp_array_import_ex():
    disp_df = pd.read_excel("Tareas_por_Asignar.xlsx", sheet_name='Disponibilidad')
    disp_df.fillna(0)
    disp_array = disp_df[1:].to_numpy()

    return disp_array
#-----
def personas_import_ex():
    personas = pd.read_excel('Tareas_por_Asignar.xlsx', sheet_name='Disponibilidad',
```

```

skiprows=1, header=0)
personas.fillna(0)
personas_df = personas.loc[:, 'Usuario']
personas_array = personas_df[1:].to_numpy()

return personas_array
#-----
def tareas_array_import_ex():
    modelado_df = pd.read_excel('Tareas_por_Asignar.xlsx', sheet_name='ModeladoDiseño',
skiprows=1, header=0)
    modelado_df.fillna(0, inplace=True)
    boolean = modelado_df['Modelador']==0
    modelado_df2 = modelado_df[boolean]
    tareas_lista = modelado_df2.loc[:, 'ID']
    tareas = tareas_lista[0:].to_numpy()
    tareas_array = modelado_df2[0:].to_numpy()

    return tareas_array
#-----
def ratios_import_ex():
    ratios_df = pd.read_excel("Tareas_por_Asignar.xlsx", sheet_name='Ratios')
    ratios_df.fillna(0)

    return ratios_df
#-----
def expprevia_array_import_ex():
    expprev_obra = pd.read_excel("Tareas_por_Asignar.xlsx", sheet_name='Obra-Usuario',
skiprows=1, header=0)
    expprev_obra.fillna(0)

```

```

return expprev_obra
#-----
def dificultad_array_import_ex():
    dificultad_df = pd.read_excel("Tareas_por_Asignar.xlsx", sheet_name='Dificultad_obra',
skiprows=1, header=0)
    dificultad_df.fillna(0)

    return dificultad_df
#-----
def restricciones_import_df():
    restricciones_df = pd.read_excel("Tareas_por_Asignar.xlsx", sheet_name='Restricciones',
skiprows=1, header=0)
    restricciones_df.fillna(0)

    return restricciones_df
#-----

def completion_time(disponibilidad_array, tarea_array, ratios_df, expprev_df, dificultad_df,
multiplicadores_dificultad):

    lista = []

    aplicacion = tarea_array[3]
    estructura = tarea_array[4]
    id_tarea = tarea_array[0]
    peso = float(tarea_array[5])
    obra = tarea_array[1]
    tip_tarea = tarea_array[7]
    fecha_req_str = tarea_array[8]

```

```

# Debes modificar la fecha de hoy
fecha_req = datetime.strptime(fecha_req_str, '%d/%m/%Y')
fecha_hoy = datetime.strptime('27/04/2020', '%d/%m/%Y')
tiempo = fecha_hoy - fecha_req

## Reviso el multiplicador de dificultad de la obra para los que no han trabajado en ella
anteriormente
dificultad_obra = dificultad_df.loc[(dificultad_df['Nombre de la Obra'] == obra)]
nivel_dificultad = dificultad_obra['Nivel de Dificultad'].item()
df_multiplicador =
multiplicadores_dificultad.loc[(multiplicadores_dificultad['Dificultad'] == nivel_dificultad)]
multiplicador = df_multiplicador['Multiplicador'].item()

# Reviso el ratio de HH/Tn de la tarea que quiero asignar
# los ratios se modifican en el Google Sheets Disponibilidad_Experiencia
ratios_estructura = ratios_df.loc[(ratios_df['Estructura'] == estructura)]
ratio = (ratios_estructura.loc[:,tip_tarea]).item()

for i in range(len(disponibilidad_array)):
    experiencia = float(disponibilidad_array[i][2]) #para todas la filas en la columna 2
    nombre = disponibilidad_array[i][1]
    carga_lab = float(disponibilidad_array[i][10])
    disp_dia = float(disponibilidad_array[i][8])
    tiempo_netto = 0
    n = 1
    row = 1

# Creo una variable "N" que va a ser el multiplicador (% basado en la exp)
if experiencia == 5:

```

```

n = 1
if experiencia == 4:
    n = 1.14
if experiencia == 3:
    n = 1.30
if experiencia == 2:
    n = 1.45
if experiencia == 1:
    n = 1.60

```

Reviso el tiempo previo solo en base a si a trabajado antes en la obra, variable binaria si ha trabajado en la obra o no

```

if len(expprev_df.loc[(expprev_df['Nombre de la Obra'] == obra) &
(expprev_df['Usuario'] == nombre)]) >= 1:
    tiempo_previo = 0
else:
    tiempo_previo = multiplicador

```

```

#-----
# Método 1: El tiempo_netto es igual para todos
#tiempo_netto = ratio*peso
#retraso = round((((tiempo.days)*disp_dia + tiempo_netto + carga_lab),2)
#-----

```

```

#-----
# Método 2: El tiempo_netto es igual para todos
tiempo_netto = round(n*ratio*peso + tiempo_previo,2)
retraso = round((((tiempo.days)*disp_dia + tiempo_netto + carga_lab),2)

```

```

#-----

array = [id_tarea, tip_tarea, nombre, tiempo_netto, fecha_req_str, retraso]

lista.append(array)
array = []

lista_df = pd.DataFrame(lista, columns=['ID', 'Tipo.Labor', 'Modelador', 'Tiempo.Est',
'Fecha Requerida', 'Criterio'])

return lista_df

def tiempo_min(completion_time, disponibilidad_array):
    minimo = 10000
    persona = ""
    fila = ""
    restricciones = restricciones_import_df()

    # Reviso quien es el que lo hace mas rapido
    for index, row in completion_time.iterrows():
        retraso = row['Criterio'] # factor de decision
        if retraso < minimo:
            minimo = row['Criterio']
            tiempo = row['Tiempo.Est']
            tarea = row['ID']

        for j in range(len(disponibilidad_array)):
            boolean = restricciones[restricciones['ID']== tarea]
            boolean2 = boolean[boolean['Usuario']== row['Modelador']]
            length = len(boolean2)

```

```
        if row['Modelador'] == disponibilidad_array[j][1] and
float(disponibilidad_array[j][9])-tiempo > 0 and length == 0:
    persona = row['Modelador']
```

```
if persona != "":
```

```
    for k in range(len(disponibilidad_array)):
```

```
        if persona == disponibilidad_array[k][1]:
```

```
            carga_laboral = float(disponibilidad_array[k][10])
```

```
            fila = float(disponibilidad_array[k][0])
```

```
            nueva_carga = carga_laboral + tiempo
```

```
            disp_semanal = float(disponibilidad_array[k][9]) - tiempo
```

```
            disponibilidad_array[k][10] = nueva_carga
```

```
            disponibilidad_array[k][9] = disp_semanal
```

```
if persona == "":
```

```
    persona = "No hay capacidad"
```

```
    minimo = "No hay capacidad"
```

```
return [persona, tiempo, minimo]
```

```
def asignador():
```

```
    # Abres las hojas necesarias
```

```
    disponibilidad_array = disp_array_import_ex()
```

```
    tareas_array = tareas_array_import_ex()
```

```
    ratios_df = ratios_import_ex()
```

```
    expprev_df = expprevia_array_import_ex()
```

```
    dificultad_df = dificultad_array_import_ex()
```

```
    # Defino variables de iniciacion
```

```

cargas_laborales = []
personas_idoneas = []
modeladores = []
multiplicador_valores = {'Dificultad': ['Alta', 'Media', 'Baja'], 'Multiplicador': [1.5, 1, 0.7]}
multiplicadores_dificultad = pd.DataFrame(multiplicador_valores, columns =
['Dificultad', 'Multiplicador'])

# Abres todas las tareas y comienzas con la i
for i in range(len(tareas_array)):
    # Ejecutas el completion_time para esa tarea en especifico
    tarea_array = tareas_array[i]
    completion_array = completion_time(disponibilidad_array, tarea_array, ratios_df,
expprev_df, dificultad_df, multiplicadores_dificultad)

    # Filtras de completion_array quien lo va a hacer mas rapido
    persona_tiempo_idoneo = tiempo_min(completion_array, disponibilidad_array)
    personas_idoneas.append(persona_tiempo_idoneo)

    persona_tiempo_idoneo = []

# Cuando ya terminaste de revisar quienes van a hacer cada tarea lo juntas con la lista de
tareas
listo = np.append(tareas_array, personas_idoneas, axis=1)
listo_df = pd.DataFrame(listo, columns=['ID', 'Obra', 'Dificultad', 'Aplicacion', 'Estructura',
'Peso', 'Estado', 'Tipo_Modelo', 'Fecha_Req', 'Modelador_1',
'Tiempo_Est', 'Retraso_Adelanto', 'Modelador', 'Tiempo', 'Retraso'])
listo_df.fillna(0)

listo_df.drop(['Modelador_1', 'Tiempo_Est', 'Retraso_Adelanto'], 1, inplace=True)

```

```
disponibilidad_df = pd.DataFrame(disponibilidad_array,
columns=['Item','Usuario','Exp','Puesto','Gestion','Desarrollo','Produccion','Dibujo','Disp.dia',
'Disp.Periodo', 'Carga.Laboral'])
```

```
# Create a Pandas Excel writer using XlsxWriter as the engine.
```

```
worksheet = pd.ExcelWriter('Asignador_Resultado.xlsx', engine='xlsxwriter')
```

```
# Convert the dataframe to an XlsxWriter Excel object.
```

```
listo_df.to_excel(worksheet, sheet_name='Tareas_Asignadas')
```

```
disponibilidad_df.to_excel(worksheet, sheet_name='Disponibilidad_Experiencia')
```

```
worksheet.save()
```

```
return listo_df, disponibilidad_df
```

```
print(asignador())
```