

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**“SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN BASADO *EN BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)* Y *LEAN* PARA EVALUAR
PROVEEDORES DE ENCOFRADOS EN PROYECTOS DE
EDIFICACIONES”**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

ELABORADA POR:

ING. JORGE ALFREDO ROJAS RONDÁN

ASESOR:

MAG. FÉLIX WILFREDO ULLOA VELÁSQUEZ

LIMA, PERÚ

2023

“SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN BASADO EN *BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)* Y *LEAN* PARA EVALUAR
PROVEEDORES DE ENCOFRADOS EN PROYECTOS DE
EDIFICACIONES”

ING. JORGE ALFREDO ROJAS RONDÁN

Presentado a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en
cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado académico de:

MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

2023

Autor : Ing. Jorge Alfredo Rojas Rondán

Recomendado : Mag. Félix Wilfredo Ulloa Velásquez
Asesor de la Tesis

Aceptado por : Dra. Heddy Marcela Jiménez Yabar
Directora (e) de la Unidad de Posgrado

@ 2023; Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados o el autor autoriza a la UNI-FIC a reproducir la tesis en su totalidad o en partes.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a:

Mi amada esposa Andrea que ha sido
mi compañera, cómplice, motivación
y apoyo en todo lo que nos hemos
propuesto juntos.

A mi madre Rosa quien ha sido
mi ejemplo de buenos valores y
a mi padre Javier por con su trabajo
abrir mi interés por la construcción

A mi hermano Javier por estar
siempre presente para mí en
todo lo que he necesitado y
ser mi mejor amigo.

Jorge Rojas.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a mi asesor el Magister Félix Wilfredo Ulloa Velásquez, quien además fue mi asesor para la tesis de pregrado en la Universidad Nacional de Ingeniería y quien no solo ha sido mi profesor sino un mentor para continuar creciendo profesional y personalmente. El profesor Ulloa continúa siendo una gran motivación para futuros ingenieros en los temas de tecnologías aplicadas a la construcción y lo considero un propulsor de la metodología BIM en la Universidad Nacional de Ingeniería y en el Perú.

Así mismo agradecerle a la Dra. Heddy Marcela Jabar Jiménez, directora del Programa de Post Grado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, por dirigir el programa y permitirme presentar la presente tesis.

Un agradecimiento especial a toda la plana docente que, durante mis estudios en la unidad de postgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, tuve el agrado de conocer y recibir valiosos conocimientos que fueron impartidos en el programa de Tecnología de la Construcción.

Finalmente, un agradecimiento a todo el personal administrativo de la Facultad de Ingeniería Civil que ha sido de gran ayuda durante las gestiones de mis estudios en la unidad de post grado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
PRÓLOGO	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Formulación del problema	5
1.3.1. Problema principal.....	5
1.3.2. Problemas secundarios	6
1.4. Objetivos del Estudio.....	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	6
1.5. Antecedentes Investigativos	6
1.5.1. Antecedentes investigativos recientes en Norte América.....	6
1.5.2. Antecedentes investigativos recientes en Asia	8
1.5.3. Antecedentes investigativos recientes en Europa.....	10
1.5.4. Brechas encontradas en literatura reciente	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	13
2.1. Marco teórico	13
2.1.1. Edificaciones de altura.....	13
2.1.2. Importancia del encofrado	15
2.1.3. Procura de encofrados	17
2.1.4. Métricas Lean	18
2.1.5. Conceptos BIM.....	19
2.1.6. Automatización BIM	20
2.1.7. Nivel de Desarrollo (LOD).....	21
2.1.8. Modelos BIM para encofrados	22
2.1.9. Metodologías para la toma de decisiones	24
2.2. Marco conceptual.....	26
CAPÍTULO III: HIPOTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	28
3.1. Hipótesis principal	28
3.1.1. Variable dependiente	28
3.1.2. Variable independiente	28
3.2. Hipótesis secundaria	28
3.2.1. Variable dependiente	28
3.2.2. Variable independiente	28
3.3. Hipótesis secundaria	28

3.3.1. Variable dependiente	28
3.3.2. Variable independiente	28
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	29
4.1. Tipo y diseño de investigación	29
4.2. Unidad de análisis	29
4.3. Matriz de consistencia	32
CAPÍTULO V: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	34
5.1. Propuesta de gestión de encofrados	34
5.1.1. Sistemas de encofrados.....	34
5.1.2. Opciones de alquiler de encofrado	36
5.2. Hoja de ruta para el desarrollo del trabajo de investigación.....	38
5.3. Recopilación de datos utilizando el modelo BIM/Lean.....	39
5.3.1. Creación de parámetros BIM automatizada	39
5.3.2. Auditoría modelo BIM automatizada	49
5.3.3. Sectorización automatizada	52
5.3.4. Cálculo de parámetros automatizada.....	54
5.4. Procesamiento de la información.....	64
5.4.1. Cálculo de metrados de encofrados.....	64
5.4.2. Curva de demanda de encofrados y puesta máxima.....	67
5.4.3. Análisis de costo de encofrados.....	71
5.4.4. Indicadores de desempeño para encofrados	72
5.4.5. Proceso de Análisis Jerárquico	76
5.4.6. Seguridad y desastres naturales	81
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	85
CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Crecimiento de productividad desde 1947.....	3
Figura 1.2. Diagrama causa-efecto sobrecostos de encofrados.....	4
Figura 2.1. Cien edificios más altos por material.....	14
Figura 2.2. Componentes de costo del concreto.....	15
Figura 2.3. Tren de actividades de primer piso.	19
Figura 2.4. Flujo de nodos y cables en Dynamo para Revit.....	21
Figura 2.5. Nivel de Desarrollo (LOD) de encofrado de columna.....	22
Figura 2.6. Jerarquía AHP de metas, criterios y alternativas.	24
Figura 4.1. Modelo BIM de edificio de 20 pisos y 80 sectores.....	30
Figura 4.2. Modelo BIM de edificio de 20 pisos y 80 sectores.....	31
Figura 4.3. Modelo renderizado del Proyecto NEO 10.....	32
Figura 5.1. Sistemas de Encofrados.....	35
Figura 5.2. Unidades de alquiler para sistemas de encofrados.....	36
Figura 5.3. Hoja ruta modelo.....	39
Figura 5.4. Clases y subclases BIM.....	40
Figura 5.5. Creación de parámetro de Proyecto.....	42
Figura 5.6. Encofrado de viga con escuadras, y con pasadores.....	44
Figura 5.7. Dynamo Script para crear parámetros compartidos.....	48
Figura 5.8. Creación automatizada de parámetros compartidos.....	48
Figura 5.9. Resultado de ejecutar Dynamo script.....	49
Figura 5.10. Dynamo Script para corregir prioridad de elementos.....	50
Figura 5.11. Resultado de ejecutar script de prioridades.....	50
Figura 5.12. Dynamo script para crear nudos.....	51
Figura 5.13. Resultado de script para separar nudos.....	51
Figura 5.14. Resultados Dynamo script para nudos de placas.....	52
Figura 5.15. Dynamo script para sectorizar edificaciones.....	53

Figura 5.16. Vista 3D de modelo sectorizado con algoritmo.	54
Figura 5.17. Dynamo Scripts para parámetros MOD.....	55
Figura 5.18. Dynamo script para generar código secuencia.....	56
Figura 5.19. Dynamo script para calcular cuantías y estimación metrado de acero por cuantías.	56
Figura 5.20. Dynamo Script para modelado automático de encofrado.	57
Figura 5.21. Resultado de modelado automatizado con Dynamo.	58
Figura 5.22. Vista 3D de encofrado modelado LOD200.....	58
Figura 5.23. Dyanmo script para cálculo de pesos de encofrados.....	59
Figura 5.24. Dynamo script para calculo tiempos.	60
Figura 5.25. Dynamo Script para el cálculo de horas hombre.	61
Figura 5.26. Dynamo Script para el cálculo de consumibles de encofrado.	62
Figura 5.27. Dynamo script para calculo alquiler de encofrados.	63
Figura 5.28. Tablas de cuantificación de modelo BIM.	64
Figura 5.29. Dynamo Script para cálculo de metrados.	65
Figura 5.30. Resultados de Dynamo Script para resumen de metrados.	65
Figura 5.31. Dynamo script para metrados disgregados.	66
Figura 5.32. Resultados de resumen de encofrado disgregado.....	67
Figura 5.33. Curva de demanda y uso de encofrado.	68
Figura 5.34. Dynamo Script para calcular puesta máxima de cimentaciones.	69
Figura 5.35. Nodo para calculo puesta máxima usando Python.....	69
Figura 5.36. Resultado de cálculos de puesta máxima.	70
Figura 5.37. Curva de demanda de encofrado en USD\$.	70
Figura 5.38. Dynamo Script para cálculo de KPIs.	75
Figura 5.39. Resultados del script con KPIs de Encofrados.....	75
Figura 5.40. Esquema Jerárquico Encofrados NEO 10.	76
Figura 5.41. Dimensiones de un modelo BIM.....	82
Figura 5.42. Gestión de riesgo por ergonomía.	82

Figura 5.43. Mapeo BIM de elementos sin inspección de arriostre.	84
Figura 6.1. Flujo automatizado para modelado de encofrados en modelo de 5 pisos. ..	85
Figura 6.2. Resultados del cálculo automatizado de KPIs para modelo 5 pisos.	86
Figura 6.3. Flujo automatizado para modelado de encofrados en modelo de 20 pisos. .	86
Figura 6.4. Resultados del cálculo automatizado de KPIs para modelo 20 pisos.	87
Figura 6.5. Análisis de Sensibilidad evaluación encofrados NEO 10.	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Escala de evaluación de Saaty.....	25
Tabla 2.2 Valores propuestos para el índice de consistencia (RI).....	26
Tabla 2.3. Índices aleatorios para Cociente de Consistencia.....	26
Tabla 4.1. Matriz de consistencia	33
Tabla 5.1. Sistemas de encofrados para columnas.	37
Tabla 5.2. Sistemas de encofrados para placas y muros.....	37
Tabla 5.3. Sistemas de encofrado de vigas.....	38
Tabla 5.4. Sistemas de encofrados de losa.	38
Tabla 5.5. Grupos de parámetros.....	41
Tabla 5.6. Parámetros del grupo Modelo (MOD)	42
Tabla 5.7. Parámetros de grupo productividad (PROD)	45
Tabla 5.8. Parámetros del grupo tiempo (TIEMPO)	45
Tabla 5.9. Grupo de parámetros de encofrados (ENCOF)	46
Tabla 5.10. Grupo de parámetros de costos (COSTO).....	47
Tabla 5.11. Valores de cuantías de acero por elemento del Proyecto Neo 10.....	57
Tabla 5.12. Pesos referenciales para sistemas de encofrados.....	59
Tabla 5.13. Índice de Productividad referencial para concreto armado.	61
Tabla 5.14. Costos unitarios de alquiler para cada sistema de encofrado Peri de proyecto Neo 10.	62
Tabla 5.15. Costos de alquiler para costados de viga.....	63
Tabla 5.16. Precios unitarios de criterios de selección.....	77
Tabla 5.17. Matriz de ponderación de criterios.....	77
Tabla 5.18. Cálculo de vector principal de matriz de criterios.....	77
Tabla 5.19. Costo Unitario de alquiler de encofrado y puntales.	78
Tabla 5.20. Rendimientos sugeridos por día.	78
Tabla 5.21. Pesos por metro cuadrado de cada sistema de encofrado.....	78
Tabla 5.22. MCP con respecto a criterio Z_1 - "Costo".	79

Tabla 5.23. MCP con respecto a criterio Z_2 - Productividad.....	79
Tabla 5.24. MCP con respecto a criterio Z_3 – Grúa.	79
Tabla 5.25. MCP con respecto a criterio Z_4 - Acabado.....	79
Tabla 5.26. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_1 (Costo).....	80
Tabla 5.27. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_2 (Productividad).	80
Tabla 5.28. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_3 (Grúa).....	80
Tabla 5.29. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_4 (Acabado).....	80

RESUMEN

El concreto armado es el material más popular para edificaciones de altura en países en vías de desarrollo como el Perú. Uno de los insumos principales del concreto armado es el encofrado, cuyo costo representa alrededor de la tercera parte del costo total de la estructura de concreto armado (Johnston, 2014). En la actualidad el uso de encofrados modulares prefabricados es preferido por sobre otras opciones como encofrados de madera habilitados en obra por las ventajas en productividad y economía. Así mismo, los contratistas prefieren alquilar encofrados en lugar de comprarlos para evitar riesgos de inversión, y tener mayor flexibilidad para rentar los encofrados por tiempos y requerimientos específicos de cada proyecto. Seleccionar un proveedor de encofrados para un proyecto de edificaciones implica evaluar las propuestas desde el punto de vista técnico, económico y contractual.

Es una práctica común al momento de cotizar con proveedores de encofrados que estos coticen las soluciones de encofrados por metro cuadrado, lo cual facilita el cálculo del costo total de las soluciones para ejecutar todo el proyecto. Sin embargo, el estimar la cantidad de metros cuadrados y el tiempo que se requerirán cada una de las soluciones resulta una tarea compleja y laboriosa. La cantidad de metros cuadrados requeridos a lo largo del proyecto depende directamente del planeamiento y específicamente de aspectos como la sectorización de vaciado. En la práctica actual las estimaciones de encofrados requeridos en obra son de baja confiabilidad, además el encofrado en obra involucra muchas veces un bajo rendimiento de rotación y todo esto genera que exista una deficiente evaluación de proveedores de encofrados durante la evaluación de cotizaciones. Es por ello por lo que en la presente tesis se diseña un modelo para evaluar propuestas de proveedores de encofrados utilizando la metodología “Building Information Modeling” (BIM) y la filosofía Lean para que en base a un modelo digital cuantificar los requerimientos de metros cuadrados de encofrados, definir la sectorización del proyecto y determinar los tiempos de permanencia de cada solución de encofrado en el proyecto.

El modelo de evaluación de proveedores de encofrado utiliza la filosofía “Lean” para definir la sectorización más eficiente en uso de horas hombre. El empleo de métricas Lean tales como “tiempo objetivo”, “tiempo de entrega”, “ciclo de producción”, y “tiempo de desfase” son utilizados para definir los tiempos de permanencia de cada solución de lo encofrados. Así mismo esta metodología propone utilizar tecnologías BIM para automatizar el cálculo de cantidades, costos asociados e indicadores de eficiencia de uso de encofrados. Estos indicadores son parte del modelo BIM/Lean para medir y comparar alternativas. Finalmente, mediante el empleo de “Análisis de Decisión de Multi Alternativa” (MADA) se diseña un método para identificar la propuesta de encofrado óptima basado en atributos diferentes a los económicos para proyectos de edificaciones.

Palabras Claves: Building Information Modeling (BIM), Diseño Generativo, Automatización BIM, Lean Construction, Análisis de Decisión Multi Alternativa (MADA), Encofrados, Concreto Armado, Edificaciones.

ABSTRACT

Reinforced concrete is the preferred material for high rise buildings in developing countries like Peru. Formwork is one of the main components of reinforced concrete, which cost could be even higher than the combined cost of concrete and reinforced steel. Using prefabricated modular formwork is a preferred current practice over other options like built on site timber formwork because of the advantages related to productivity and economy. Also, contractors prefer renting formwork instead of owning them to avoid an investment risk and having better flexibility for renting the right amount and time of formwork for each specific project. Selecting a formwork provider for a building project involves a tradeoff between different proposals considering technical, cost, and contractual aspects.

A frequent practice from formwork providers during a bidding process is estimating the renting cost of each formwork solution based on the amount of square meters of contact area, which makes easier computing the total cost of each formwork solution for the entire project. Although, computing the square meters of required formwork area and the time each formwork solution will remain in the project is a complex and time-consuming task. The required formwork area during the project depends directly on the planning process and specifically on the definition of the concrete pour schedule and work zone layout. In current practice, there is uncertainty about formwork quantity estimation and a low performance of formwork reuse, which impacts a deficient assessment of the best formwork option during a bidding process. This is the main reason this thesis proposes a methodology for comparing formwork providers proposals' using Building Information Modeling (BIM) methodology and Lean philosophy, for computing quantities take off, defining the optimal work zone layout, and estimating the time each formwork will remain in the construction project.

Formwork proposals assessment model is based on Lean philosophy for defining the most efficient work zone layout that will allow reducing the use of labor hours. Use of Lean metrics like takt time, lead time, cycle time and lag time are used for scheduling the time each formwork solution will be required during the project. Also, the methodology proposed is using BIM technologies for automating the computing of formwork quantities take off, cost, and Key Performance Indicators (KPIs) for formwork planning. These KPIs are an important part of the Lean/BIM based tool for assessing and comparing alternatives. Finally, Multi Alternative Decision Analysis (MADA) methods are used for selecting a formwork provider based not only on the cost, but also taking into consideration other attributes that are complex to include in the cost analysis or monetary terms for formwork alternatives in high rise building projects.

Key words: Building Information Modeling (BIM), Generative Design, BIM Automation, Lean Construction, Multi Alternative Decision Analysis (MADA), Formwork, Reinforced concrete, high rise buildings.

PRÓLOGO

La presente tesis esta desarrollada en seis capítulos. El Capítulo I es la introducción que describe la problemática en la práctica actual para la evaluación de proveedores de encofrados en proyectos de edificaciones. La problemática explica la justificación de la importancia del estudio debido a lo complejo y laborioso de esta tarea bajo las practicas actuales. Esta sección también incluye el planteamiento del problema principal y secundarios para finalmente describir el objetivo general y los objetivos específicos de la tesis. La sección finaliza con una descripción de los antecedentes relacionados a la investigación utilizando referencias recientes a nivel mundial y regional.

En el Capítulo II, se desarrolla el marco teórico para la tesis. El marco teórico se descompone en la literatura relacionada a cuatro temas importantes para la investigación. El primer tema es la gestión de encofrados, el segundo es la filosofía Lean y sus métricas, el tercer tema está relacionado a la metodología BIM y su automatización. El último y cuarto tema del marco teórico está relacionada a los métodos de “Análisis de Decisión Multi Alternativa” (MADA). En este capítulo también se desarrolla el marco conceptual en el cual se describen términos de una palabra con la interpretación que se le está dando en la presente tesis.

En el Capítulo III, se plantean la hipótesis principal y las dos hipótesis secundarias explicando las variables dependientes e independientes para cada una de ellas.

En el Capítulo IV, se plantea el tipo y diseño de la investigación. Se detalla la unidad de análisis para esta investigación y se finaliza con el desarrollo de la matriz de consistencia para la investigación.

En el Capítulo V, se explica el desarrollo del modelo BIM/Lean para la evaluación de proveedores de encofrados. El método propuesto incluye una auditoria automatizada del modelo BIM, luego se describe el proceso de modelamiento automatizado del encofrado, así como el flujo de trabajo para realizar la sectorización de vaciado utilizando el modelo. Luego el modelo de encofrados es complementado con parámetros BIM que servirán para realizar las operaciones correspondientes a la evaluación de proveedores de encofrados. También desarrolla el proceso de automatización para el computo de cantidades de encofrado requerido, así como el análisis costo total asociado, y el computo de los Indicadores de Desempeño propuestos para la planificación de encofrados. Al final se analiza las ventajas de un modelo en base a métodos MADA para la toma de decisiones como parte del diseño del modelo propuesto.

En el Capítulo VI se realiza un análisis y discusión de los resultados obtenidos del modelo de evaluación realizando un análisis comparativo con dos proyectos de edificaciones de geometría similar, misma área techada, pero con variación en el número de pisos y sectores por planta. Como parte de la evaluación se toma en consideración los resultados de la herramienta planteada como son la curva de puesta máxima de encofrado, y los indicadores de desempeño. Se concluye con el análisis de los resultados del empleo de la herramienta MADA que no solo está basado en el costo del encofrado para seleccionar la mejor propuesta.

Al final de la tesis se presenta las conclusiones del presente estudio, así como las recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas al tema.



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se desarrolla una introducción al tema en estudio para la presente tesis. En generalidades se explica como la tesis mejorará la situación actual de la planificación de encofrados en proyectos de edificaciones y en específico como se mejorará el proceso de evaluación de propuestas de proveedores de este servicio. Así mismo se plantea la problemática actual especificando el problema general que se abordará en la tesis, así como los problemas secundarios. Luego de identificado la problemática, se plantean a modo de preguntas que problemas a resolver con la presente investigación. Luego se definen el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación para mejorar la problemática identificada en la planificación de encofrados. Finalmente se incluye en este capítulo los antecedentes de la literatura vigente existente.

1.1.Generalidades

La construcción es una de las industrias cuya evolución de su productividad se ha visto menos influenciada con el desarrollo tecnológico. Esto se refleja en la pobre evolución de muchos de sus procesos. En específico la planificación de los encofrados casi se ha mantenido de la misma forma durante las últimas cinco décadas y no se han implementado nuevas técnicas ni herramientas que permitan mejorar la baja confiabilidad de las estimaciones, o la deficiente evaluación de proveedores, o el bajo rendimiento de la rotación de los encofrados. Uno de los cambios tecnológicos que está aumentando en el sector construcción es la utilización de modelos digitales inteligentes llamados también modelos BIM por sus siglas en inglés “Building Information Modeling”. Los modelos BIM son cada vez más comunes en los proyectos, sin embargo, estos modelos están principalmente enfocados en solo los elementos permanentes del edificio y no en obras temporales como los encofrados. Es por ello por lo que en la planificación de encofrados es muchas veces complicado contar con un modelo BIM disponible para las etapas iniciales de planificación. Debido al alto costo, y tiempo de implementación de estos modelos BIM para encofrados es que este servicio de modelamiento será implementado por el futuro proveedor de encofrados una vez sea adjudicado con el proyecto y no durante las etapas tempranas de planificación.

El problema de no contar con un modelo BIM en las etapas iniciales de planificación, es que los contratistas cuentan con muy poca información disponible para tomar una decisión tan importante como seleccionar el mejor postor de encofrado para la ejecución del proyecto. Esto sumado a el reducido tiempo durante una licitación, conlleva a que se comentan errores en las estimaciones lo que implica que los contratistas asuman riesgos por las incertidumbres de sus estimaciones en el planteamiento. En la práctica actual muchos contratistas siguen estimando áreas de encofrados en base a ratios históricos, o cuantificando pequeñas áreas representativas del edificio para extrapolar valores para el resto del proyecto. Estas incertidumbres generan que el contratista asuma contingencias que muchas veces no son suficientes lo que genera pérdidas económicas o por el contrario contingencias excesivas que generan que el contratista pierda licitación.



La finalidad de la presente investigación es reducir el vacío que la practica actual enfrenta por la falta de metodologías para la planificación de los encofrados en proyectos de edificaciones. Para ello se desarrolla un modelo que automatiza el proceso de sectorizar una edificación, así como automatiza la cuantificación de encofrado requerido en cada sector de vaciado y estima su permanencia en obra.

El costo por metro cuadrado es un buen indicador para que los contratistas comparen con otros proyectos y competidores, pero no es muy buen indicador de la eficiencia del uso de los encofrados considerando la rotación de estos. Por ello la investigación analizará nuevos indicadores que consideren la eficiencia de la rotación.

Por último, el costo no es el único factor para considerar en una propuesta por lo que se propone también en la tesis una metodología que considere el costo, pero además otros atributos para la identificación del mejor postor como proveedor de encofrados. Muchas veces existen atributos que son complicados de considerar en términos de costos por lo que muchas veces se les termina ignorando cuando se analiza y decide entre alternativas múltiples. Esta tesis estudiará este problema y diseñará una metodología que considere estos atributos en el proceso de selección entre múltiples postores o alternativas.

1.2.Descripción del problema

Según el reporte “Reinventando la construcción: Una ruta para mejorar la productividad” realizado por (McKinsey&Company, 2017) la industria de la construcción ha tenido un crecimiento muy bajo de su productividad, alcanzando apenas el 6% desde la década de los cincuenta. Por otro lado, otras industrias como por ejemplo la manufactura creció alrededor del 760% o la agricultura que creció alrededor del 1,500% en el mismo periodo. En la Figura 1.1. se observa como la construcción no ha mejorado en términos de productividad, a diferencia de todas las otras industrias que han tenido un crecimiento exponencial en los últimos 50 años. El estudio también concluye que la construcción ha tenido el menor desarrollo tecnológico, dentro de todas las industrias lo cual se refleja como resultado en el bajo crecimiento de su productividad. Los autores concluyen que el problema de la baja productividad de la construcción es que esta industria representa muchas barreras para implementar nuevas tecnologías, a diferencia de otras industrias que sus integrantes son más flexibles para adoptar nuevas herramientas y tecnologías.

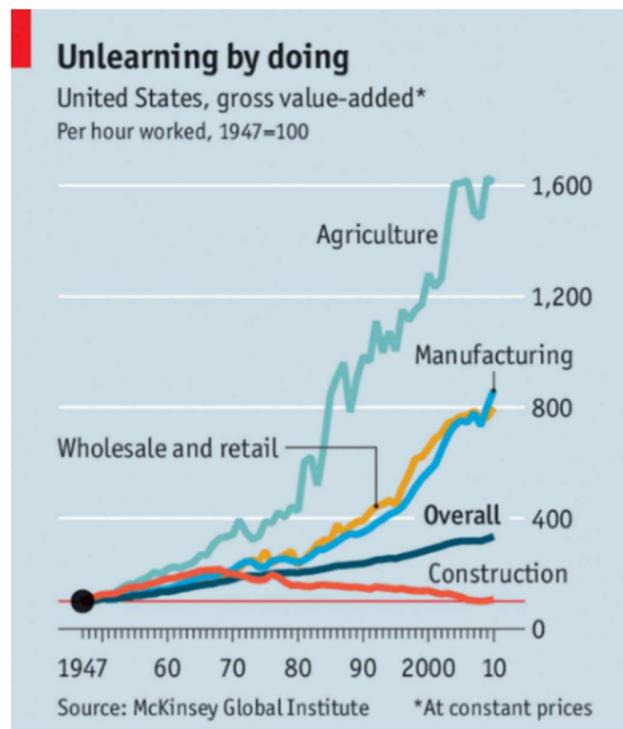


Figura 1.1. Crecimiento de productividad desde 1947.

Fuente: (McKinsey&Company, 2017)

En el libro “Encofrado para estructuras de concreto” de los autores (Peurifoy & Oberleder, 2011) señalan que, debido a la complejidad del planeamiento y la gestión de los encofrados, es que muchas veces se generan grandes sobrecostos relacionados a pérdidas, daños materiales, costos de mantenimientos no planificados de los equipos de encofrados, así como ineficiencias en la rotación de estos o inclusive equipo sin utilizar alquilado en obra. Los autores señalan que un problema del planeamiento del encofrado es que no se consideran todos los factores que involucran la economía de este. Factores sugeridos por los autores a considerar en el análisis de la economía del encofrado incluyen los materiales, la mano de obra en las distintas fases (habilitado, instalación y desencofrado), y el equipo necesario para manipular los encofrados. Sin embargo, muchas veces la selección de los encofrados se basa únicamente en uno de o algunos factores lo cual genera error en la toma de decisiones. Un problema identificado por los autores es que los responsables del planeamiento no consideran el costo del ciclo de vida del encofrado. Un encofrado de mayor costo inicial como un encofrado metálico, tendrá un mayor costo de recuperación al final del proyecto y además reducirá en costo de los acabados de las superficies de concreto luego del desencofrado. Pero muchas veces los responsables de tomar las decisiones relacionadas al encofrado no consideran todas estas variables en el planeamiento.

En la figura 1.2 se desarrolla un análisis de causa efecto de la problemática del encofrado en proyectos de edificaciones para identificar la causa raíz del problema del sobre costo

de encofrados. En esta figura se evidencia que en todos los ramales del diagrama siempre tienen como una causa raíz a una pobre sectorización en la cual los recursos no han sido debidamente balanceados o a tener material excesivo de encofrado en obra, muchas veces asociado a una mala estimación de los recursos. Este hallazgo se basa en lo mencionado por los autores y está relacionado al comportamiento de la mayoría de los contratistas que intentan asegurarse de tener material suficiente en obra para garantizar el flujo de la construcción. Sin embargo, muchas veces los contratistas sobreestiman esta contingencia y se genera un problema por ser excesiva e innecesaria. El problema raíz luego del análisis de lo explicado por los autores está relacionado a la baja confiabilidad de las estimaciones de cantidad de encofrado requerido en obra lo que conlleva a estos otros problemas mencionados como sobrecostos, baja rotación de encofrado, pérdidas de piezas de encofrados, y mayor consumo de materiales.

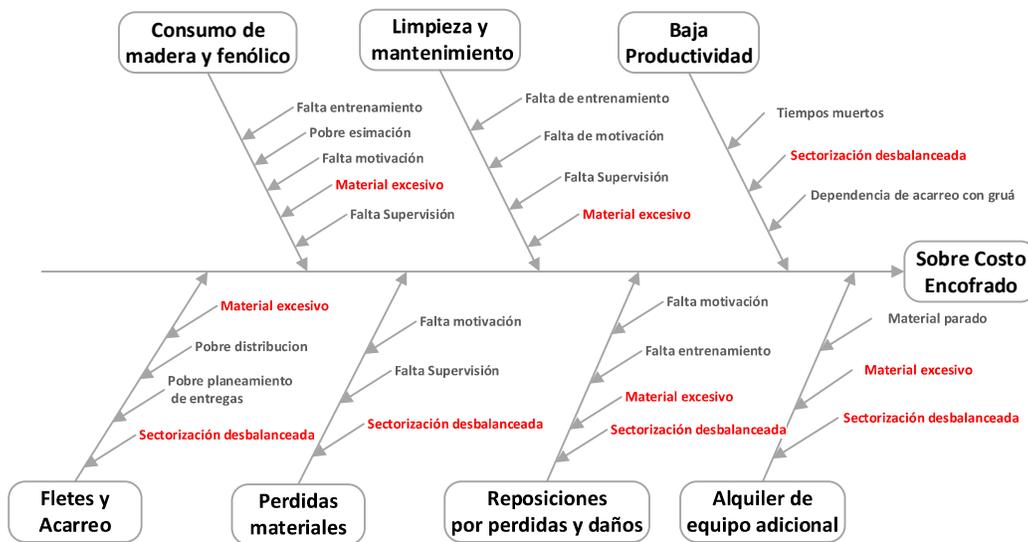


Figura 1.2. Diagrama causa-efecto sobrecostos de encofrados.

Fuente: Adaptado de (Peurifoy & Oberleder, 2011)

En su libro “Encofrado para concreto”, el autor (Johnston, 2014) describe el problema de la baja rotación de los encofrados que se presenta desde la etapa de planteamiento. Los contratistas basan su análisis de encofrado únicamente en el costo unitario del encofrado ($\$/m^2$) y se deja de lado otras consideraciones que describen la eficiente rotación del encofrado. El costo unitario es una referencia del desempeño del encofrado, pero que esta afectado por los precios unitarios propuestos por los proveedores por lo que este indicador se distorsiona por la variable de los precios unitarios que los arrendadores ofertan para un proyecto. El costo unitario no aísla la eficiencia del encofrado debido a su rotación ya que se ingresa la variable costo para ponderar los diferentes sistemas de encofrados.

Según (Johnston, 2014) al igual que costo por metro cuadrado del encofrado no es el único o el mejor indicador para medir la eficiencia del uso del encofrado, tampoco debe



ser el único factor para considerar en un análisis para decidir la mejor alternativa de encofrado. El utilizar como único factor de criterio de decisión al costo genera una deficiente evaluación de opciones al momento de decidir entre diferentes alternativas de planeamiento para el uso de encofrados. Otros factores son complicados de cuantificar en términos monetarios por lo que terminan siendo ignorados. Existen muchos factores difíciles de expresar en términos de costo como por ejemplo el soporte técnico, la velocidad de respuesta de un proveedor, la calidad y velocidad de ingeniería de un proveedor que si bien afectan el costo final del proyecto es muy complicado estimar el impacto económico que estos factores tendrán en el proyecto.

En la publicación “Optimización de sectorización de encofrados verticales utilizando programación lineal mixta” los autores (Biruk & Jaskowski, 2016), identificaron que la estimación de encofrados es laboriosa y compleja debido a que muchos de las estimaciones deben realizarse de forma manual. Este problema genera que la práctica común para encontrar la mejor modulación y sectorización de los encofrados para optimizar su rotación se base únicamente en la experiencia del contratista y no existen herramientas disponibles que permitan realizar un planeamiento y gestión de los encofrados automatizando los cálculos para obtener resultados que permitan tomar decisiones basados en sustentos numéricos.

En otra publicación con el título “Cuantificación automática de encofrados de concreto utilizando Building Information Modeling” los autores (Khosakitchalert, et al., 2019), describen que la ineficiente y baja confiabilidad de la cuantificación de los encofrados se debe a que tradicionalmente este proceso se realiza de forma manual y que requiere de un amplio conocimiento y esfuerzo por parte de los profesionales dedicados a esta tarea. Los autores concluyen que la ineficiencia de este proceso se debe a que la tarea consiste en medir y calcular diferentes elementos como el encofrado basado únicamente en planos en 2D. Este proceso ingresa una variable de error humano debido a que los planos deben ser interpretados por personal calificado pero que muchas veces por la premura de los tiempos de licitación se cometen errores o estimaciones con mucha incertidumbre. Muchas veces el personal es limitado y la cantidad de horas hombre necesarias para realizar esta interpretación de planos, realizar mediciones y computar los cálculos es muy elevada lo que ocasiona que se cometan muchas veces errores y asuman contingencias con mucha incertidumbre.

1.3. Formulación del problema

Para abordar la problemática expuesta en los párrafos anteriores se han desarrollado las siguientes preguntas a resolver de la problemática planteada. Se ha planteado una pregunta principal a resolver con esta investigación, así como dos preguntas secundarias que derivan de la anterior.

1.3.1. Problema principal

¿Qué factores influyen en una deficiente evaluación de proveedores de encofrados durante la etapa de planeamiento?



1.3.2. Problemas secundarios

¿Qué factores influyen en una baja confiabilidad de las estimaciones de encofrados en la etapa de planificación?

¿Qué factores influyen en un bajo rendimiento de la rotación de los encofrados en la etapa de planteamiento?

1.4. Objetivos del Estudio

1.4.1. Objetivo general

Formular un modelo de decisión multi alternativa basado en tecnologías BIM y métricas Lean para mejorar el deficiente proceso de evaluación de proveedores de encofrados durante la etapa de planteamiento.

1.4.2. Objetivos específicos

Analizar el modelo basado en tecnologías BIM y métricas Lean para mejorar la baja confiabilidad de las estimaciones de encofrados en la etapa de planeamiento.

Formular indicadores de desempeño para mejorar el bajo rendimiento de la rotación de encofrados desde la etapa de planeamiento.

1.5. Antecedentes Investigativos

La mayoría de las investigaciones recientes relacionadas a la utilización de tecnologías BIM para la gestión de encofrados se han realizado en Norte América, Asia y Europa. A continuación, se detallan algunas de las más recientes publicaciones relacionadas al tema en estas regiones.

1.5.1. Antecedentes investigativos recientes en Norte América

En la publicación titulada “BIM para estructuras temporales: desarrollo de un plug-in Revit API para encofrado de concreto”, los autores (Gambatese & Jin, 2019) elaboraron una “Interfaz de Programación de Aplicaciones” o por sus siglas en inglés (API) para el diseño de encofrados de losas de concreto utilizando encofrado de madera. En esta referencia los investigadores utilizaron un modelo BIM para extraer la información necesaria para el modelo y complementaron la geometría del modelo con datos de entrada, al igual que utilizaron criterios de diseño del “Instituto Americano del Concreto” o por sus siglas en inglés (ACI) y criterios de seguridad de la “Administración de Seguridad y Salud Ocupacional” o por sus siglas en inglés (OSHA) para complementar los diseños.

En este caso el API primero extrae los valores geométricos de la losa de concreto para luego determinar las cargas de diseño y diseñar el tipo de triplay, así como el



espaciamiento de las vigas secundarias. El siguiente paso de la herramienta de automatización es determinar el espaciamiento y dimensiones de las vigas principales. Con el diseño de las vigas principales se procede al diseño de los puntales. Todos estos pasos se realizan revisando las propiedades de los elementos de madera de una base de datos generada previamente para alimentar a la API. Como la herramienta no solo tiene por objetivo diseñar el encofrado en base los criterios del ACI sino también de seguridad de la OSHA, se han considerado dos criterios complementarios al diseño. Adicionalmente se ha revisado que todos los encofrados que tengan más de 6 pies de altura tengan un sistema de protección de caídas (barandas) y que ninguno de los componentes de encofrado excedan los 51 libras de peso para evitar lesiones en los trabajadores por cargar exceso de peso. Se implementó un criterio de seguridad de implementar un sistema de protección a caídas de altura y un criterio de ergonomía. Esta API propuesta por los autores es capaz de diseñar las cargas, las planchas de fenólico, las vigas secundarias, las vigas principales, los puntales, revisar la capacidad portante de las bases de soporte, revisar criterios de arriostre, y finalmente plantear sugerencias del planeamiento para la instalación.

En otra investigación titulada “Sistema de soporte para la toma de decisiones basado en BIM para el diseño de encofrados” los autores (Romanovskyia, et al., 2019) elaboraron un módulo de la plataforma abierta llamado “Dynamo” para automatizar el diseño de encofrados de madera para columnas y vigas. En este caso la aplicación también toma las dimensiones de los elementos de concreto del modelo BIM y los utiliza para definir cuantas planchas de triplay y de que dimensiones serán necesarias estas planchas para encofrar las columnas y las vigas de un edificio de cinco pisos. Los resultados son exportados luego a una hoja de cálculo en Excel. En este caso la herramienta es creada a través de la programación grafica en la plataforma libre “Dynamo” para Revit. La programación grafica consiste en unir “nodos” con “vínculos” y recrear un flujo de trabajo en el programa de autoría BIM Autodesk Revit. En este caso los nodos representan procesos dentro de la herramienta Revit y los vínculos transfieren los resultados (outputs) de cada proceso o nodo hacia un nuevo proceso o nodo para ingresarlo como una entrada (inputs).

En este caso los autores (Romanovskyia, et al., 2019) complementaron la información obtenida de la geometría de los componentes del modelo BIM con los parámetros de diseño del estándar ACI 347R-14 para la estimación de cargas verticales y horizontales. Luego el programa utiliza las dimensiones y en base a una lista de formas de encofrado disponibles analiza las combinaciones a ser utilizadas para encofrar cada uno de los elementos. En este caso el programa calcula las formas necesarias para columnas de concreto; y para los costados y fondos de viga. Los resultados son incluidos en una tabla de cuantificación y agregados como atributos dentro de cada uno de los elementos de concreto dentro del modelo BIM.

En la publicación titulada “Building Information Modeling apoyado de la herramienta Cascada para la gestión de encofrados” por los autores (Mansuri, et al., 2017), los investigadores utilizaron el modelo de concreto armado de un edificio y lo complementaron con los elementos de encofrado del total de la edificación. Luego se

obtuvo un listado total de los elementos de encofrado necesarios en el total de la edificación y mediante un algoritmo de cascada se obtuvo la cantidad mínima de encofrado requerido a utilizar para cumplir a la vez con los cronogramas de vaciado optimizando la rotación de las piezas de encofrado.

Los autores describen que el proceso inicia con la preparación de un catálogo de componentes de encofrado, luego se realiza el modelado de la estructura de concreto armado en un modelo 3D. Luego un modelador ubicó manualmente los componentes de encofrado en cada uno de los elementos de concreto en el modelo BIM e identificar qué elementos de encofrado se requieren en cada uno de los sectores de vaciado. Luego se exporta la lista total de encofrados utilizados pero detallados por fase o sector de vaciado. Utilizando este listado de componentes de encofrado requeridos en cada una de las fases se ordenan los reportes en base a un número de ítem asignado. Con la nueva base de datos con los ítems asignados se procesa la información utilizando el algoritmo de cascada para encontrar la mínima cantidad de encofrado requerido para ejecutar todo el proyecto. Con esta información es posible para el edificio en estudio programar los encofrados y realizar un plan de reúso de encofrado para cada uno de los componentes.

En otra publicación titulada “Planeamiento basado en BIM de estructuras temporales para la seguridad en la construcción”, los autores (Kim & Cho, 2015) analizaron la utilización de los modelos BIM para optimizar el uso de andamios y escaleras de acceso (torres de acceso) para reducir el riesgo de accidentes en obra. En este caso los autores identificaron la necesidad de incluir las obras temporales como andamios y torres de acceso como parte del modelo BIM para realizar el planeamiento de obra de forma segura y prevenir accidentes. En este caso los autores se enfocaron en los trabajos de la construcción de un techo en una edificación por ser un trabajo con alto riesgo de caídas de altura. Así mismo desarrollaron un algoritmo con tres reglas topológicas para definir la ubicación y forma de los andamios. Las reglas incluían que las torres de acceso debían tener una distancia mínima a la zona de trabajo para facilitar la evacuación en caso de una emergencia, además los andamios debían evitar cualquier tiempo de interferencia con otra estructura o con alguna obra temporal. Los andamios y escalera de acceso también debían estar ubicadas de tal forma que evitaran cualquier conflicto con otras actividades adyacentes como por ejemplo la instalación de alguna ventana o puerta. Finalmente, con un algoritmo que considera las tres reglas mencionadas y obteniendo las dimensiones de la geometría del modelo BIM se automatizó la selección de la mejor ubicación de las obras temporales para los trabajos de instalación de un techo.

1.5.2. Antecedentes investigativos recientes en Asia

En la publicación titulada “Ampliando la interoperabilidad BIM para el proceso de monitoreo en tiempo real del encofrado de concreto” los autores (Hamooni, et al., 2020) desarrollaron una metodología para utilizar los modelos BIM de una edificación de concreto armado para interconectar el modelo con la data generada por sensores de madurez de concreto. Con esta información la interoperabilidad del modelo BIM se utilizó para el proceso de monitoreo en tiempo real del desencofrado de los elementos de concreto, reduciendo así los tiempos de encofrado al no limitarse a esperar los tiempos



estándares de desencofrado. En esta investigación se utilizaron sensores de temperatura inalámbricos que utilizaron etiquetas de identificación de radio frecuencia (RFID) para enviar la data en tiempo real a una base de dato que se interconectaría a través de una API con la base de datos del modelo BIM. Para la prueba de este experimento se utilizó un proyecto real en Irán en la cual la data de los sensores era almacenada en los archivos IFC del modelo. El sistema propuesto logró predecir que los encofrados se retiraran entre 4.5 días y 18.4 días antes que lo estipulado en códigos y estándares de concreto como BS 81100:1997 y IS 456:2000. El proceso en campo consistió en plantar los sensores en el concreto fresco, luego recolectar la información relacionada a temperatura y humedad en campo. Esta información luego fue transferida a un servidor vía Wi-Fi y a través de la Revit API diseñada por los investigadores se extendió la interoperabilidad BIM con un “add-in” en formato IFC.

En otra publicación titulada “Cuantificación automática de encofrados de concreto utilizando Building Information Modeling” los autores (Khosakitchalert, et al., 2019) desarrollaron una codificación y un algoritmo para automatizar el cálculo del área de encofrado de cada uno de los elementos de concreto armado de un edificio a partir de un modelo BIM, pero sin la necesidad de tener que modelar los encofrados. En esta investigación se consideró el cálculo de encofrado para cimentaciones, columnas, vigas, losas, muros, y escaleras. Con este algoritmo propuesto y el API elaborado como parte de la investigación se logró ahorrar tiempo de los ingenieros para cuantificar estos encofrados y reducir errores humanos. Para la elaboración del “script” los investigadores utilizaron “Dynamo” y para la lectura del modelo BIM utilizaron Revit 2018. El algoritmo implementado esta compuesto básicamente de dos etapas. La primera etapa es la identificación de las caras a encofrar de cada uno de los elementos de concreto armado y la segunda etapa consistía en clasificar cada una de las caras identificadas y calcular su correspondiente área de encofrado. Este algoritmo se testeó en el edificio de la facultad de arquitectura de la universidad de Chulalongkorn y se comparó con las cuantificaciones realizadas mediante la obtención manual de las áreas de las caras de encofrado en otro programa llamado Sketch Up. Los resultados obtenidos de forma manual y los resultados obtenidos con el “Dynamo script” propuesto por los investigadores coincidió al 100% sin ninguna variación y con una precisión de 0.01.

En la publicación titulada “Optimización automatizada del diseño de encofrado a través del análisis espacial en el modelamiento BIM” de los autores (Hyun, et al., 2018), los investigadores desarrollan una extensión del esquema “Industry Foundation Class” (IFC) y diseñan nuevas entidades IFC para el triplay, los barrotes y los largueros para automatizar el diseño de encofrados en madera de muros de concreto armado. Como resultado de la investigación se pudo obtener de forma directa la información de los muros de concreto armado del modelo BIM y esta información en combinación con otros valores de entrada como velocidad de vaciado, temperatura, costo de materiales se estima diferentes alternativas de diseño del encofrado en madera y se selecciona la más económica.

En este caso la investigación de los autores (Hyun, et al., 2018) toma la información de la geometría directamente de los archivos IFC del modelo BIM. La información

considerada para la extracción de los archivos IFC incluye parámetros como dimensiones, forma, coordenadas, y relaciones paramétricas entre elementos. Toda esta información es luego almacenada en una base de datos del muro de concreto armado del cual se diseñará el encofrado. Luego con esta información se realiza el diseño automatizado del encofrado. El proceso consiste en seleccionar los valores de entrada (geometría), para luego calcular las coordenadas de los parantes de encofrado de madera, así como las coordenadas de los largueros para luego modelar en 3D el sistema de encofrados. Durante el proceso de diseño se realiza una evaluación de las cantidades de triplay, parantes y largueros los cuales son afectados por precios referenciales de costos de la revista americana “RSMMeans” para calcular el costo del encofrado para cada una de las alternativas y con ellos realizar diferentes simulaciones para identificar el diseño de encofrado con el menor costo, la cual el programa reconocerá como el diseño óptimo.

En la publicación “Método de medición de la productividad del encofrado estructural asistido por BIM” de los autores (Lee, et al., 2017), se utiliza los modelos BIM para el control de la productividad de la mano de obra relacionada al encofrado de elementos de concreto armado. En este caso los autores usaron el modelo BIM para cuantificar la cantidad de metros cuadrados de encofrado y luego afectaron las cantidades por los índices de productividad para obtener el total de horas hombre requeridas. En esta investigación se utilizó como muestra de experimento un proyecto en Corea de siete pisos de departamentos y con sótanos de estacionamientos. En este edificio se clasificó los encofrados en techos formados con fenólico, muros con formaletas de aluminio manu portable, y encofrados pre armados para las fachadas. Luego se entrenó a un ingeniero de campo para que registre la información diariamente de los avances de encofrado en metros cuadrados, así como la cantidad de carpinteros dedicados cada día a esas tareas. Luego en base a ratios de productividad predefinidos se proyectó cuantos debían ser los metros cuadrados avanzados cada día para cada tipo de encofrado y se comparó con las ratios de productividad reales obtenidos cada día. Finalmente se obtuvo ratios ponderados reales y proyectados de cada uno de los tipos de encofrados, así como por departamentos y se hizo seguimiento a lo largo de la obra. En este caso la herramienta BIM fue utilizada como una base de datos de cantidades (computadas en base a parámetros) y cantidad de días hombre para monitorear la productividad de la partida de encofrado estructural.

1.5.3. Antecedentes investigativos recientes en Europa

En la publicación titulada “Utilizando información BIM de los componentes de una edificación para el planeamiento de encofrados” realizada por (Singh, et al., 2017), los autores desarrollaron una API, para tomar información del modelo BIM de un muro de concreto armado para automatizar el diseño del encofrado manu portable de este muro. El objetivo de la creación de esta API es que con el resultado obtenido con esta herramienta de automatización BIM, se genere un modelo BIM del encofrado y que luego este modelo se utilice para identificar interferencias, generar visualizaciones de sectorización, preparar planos de montaje de encofrados, generar cronogramas que especifiquen la rotación de los encofrados, así como elaborar otros recursos de planeamiento.



Los autores (Singh, et al., 2017) utilizaron programación orientada a objetos con el lenguaje C# para automatizar el diseño y modelamiento de encofrados de muro en una herramienta de autoría BIM. La herramienta de autoría BIM seleccionado por los autores para el desarrollo del “plug-in” fue el software de Autodesk llamado Revit. Un “plug-in” es un comando adicionado en la “Interfase Grafica del Usuario” o por sus siglas en inglés (GUI), que permite ingresar una serie de valores de entrada (input) para ser procesados en un flujo de programación. La herramienta creada por los autores automatiza el proceso de obtención de la información geométrica del elemento de concreto vaciado in situ, en este caso el muro de concreto armado. Luego la API utiliza los datos obtenidos para computar los componentes de un sistema de encofrado de madera para muros. Con los datos de la geometría del muro se dimensiona la sección y espaciamiento de los barrotes verticales, los largueros horizontales y el espesor de las planchas de triplay. Con la información generada del diseño automatizado de los elementos del encofrado se realiza un modelamiento paramétrico de los componentes y se adicional al modelo existente del muro. Luego estos componentes son alimentados con información y pasan a formar parte del modelo BIM y para la identificación de interferencias, planeamiento 4D, cuantificación de encofrados, generación de planos de detalle para montaje, etc.

1.5.4. Brechas encontradas en literatura reciente

De toda la bibliografía revisada se ha identificado que la gran mayoría de la literatura e investigación reciente se ha orientado a utilizar los modelos BIM para automatizar procesos de diseño, modelado y elaboración de esquemas de rotación de los encofrados. El problema con esta opción de modelar un encofrado en específico es que muchas de las decisiones que se toman durante el planeamiento del proyecto no cuentan con un modelo de encofrado o ni siquiera se ha definido un tipo de encofrado. Además, el modelado de encofrado demanda un consumo importante consumo de recursos, así como de tiempo que solo se justificaría una vez que se tenga definido al proveedor que en algunos casos ya tiene librerías BIM de sus elementos de encofrado. Además, estas investigaciones se han orientado al diseño y modelado de un tipo de encofrado en específico como es el caso de los encofrados de madera, el cual es muy poco común su utilización especialmente cuando hablamos de una producción y vaciado de concreto más industrializado. Otra brecha importante de la investigación desarrollada hasta el momento es que la gran mayoría de los autores se han concentrado únicamente en un tipo de elemento para su análisis. En algunos casos se concentran únicamente en los muros, otros casos en las columnas, en otros las vigas e inclusive las losas. Pero no hay publicaciones en que se ha realizado un análisis del encofrado considerando todos los elementos de concreto armado. Tampoco existen casos en los que se ha analizado los diferentes sistemas de encofrado que normalmente se presentan en un proyecto de edificaciones.

Tomando como referencia las brechas encontradas en otras investigaciones la presente tesis considera los siguientes puntos a cubrir en la investigación. La metodología propuesta no debe limitarse únicamente al diseño del encofrado sino a la etapa de planeamiento que no ha sido aun bien atendida en la literatura existente. La metodología propuesta no debe orientarse a un único tipo de encofrado ya que en etapas tempranas de planeamiento no se ha definido aún el tipo de encofrado. Así mismo, no debe solo



considerarse un solo elemento de encofrado sino todos los sistemas de una edificación. En los proyectos los contratistas trabajan con todos los sistemas que normalmente comprende un edificio (columnas, muros, vigas, losas, etc.) Finalmente, la metodología propuesta debe evitar la necesidad de modelar todo el encofrado y sus componentes puesto que estos consumen mucho tiempo y para etapas tempranas de planeamiento esto no aún no es necesario ni justificable.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Marco teórico

2.1.1. Edificaciones de altura

(Klepeis, et al., 2001) “La encuesta nacional del patrón de actividad humana”

De acuerdo con los autores los habitantes de zonas urbanas pasan el 90% de sus vidas en el interior de edificios. Esta encuesta también conocida como su por sus siglas en inglés como NHAPS, es la encuesta con mayor tamaño de muestra realizado en los Estados Unidos con el objetivo de estudiar las actividades relacionadas al ser humano en su medio ambiente físico. Este estudio es una encuesta realizada por vía telefónica a más de 9,000 entrevistados durante un periodo de 2 años por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por sus siglas en inglés (EPA). La más importante conclusión de este estudio es que los encuestados estuvieron el 87% del tiempo de sus actividades diarias dentro de un edificio (sea su vivienda, oficina o centro de esparcimiento) y un 6% del tiempo dentro de sus vehículos (privados o públicos). De esto se concluye que el ser humano solo pasa alrededor de menos del 7% en espacios abiertos al exterior de sus edificaciones. De este estudio se resalta la importancia de las edificaciones en la vida cotidiana del ser humano. Por ello la justificación de orientar la investigación de la presente tesis en específico a las edificaciones.

En zonas de gran densidad poblacional, estos edificios se han visto restringidos a un crecimiento vertical, haciendo cada vez más altos a los mismos. Esto principalmente se debe a que las ciudades se vuelven polos atractores de empleos, negocios y por tanto vivienda con el objetivo de reducir los tiempos de transporte. Es por ello por lo que las ciudades concentran una mayor cantidad de edificios de altura, ya que el reducido espacio y la necesidad para albergar una gran densidad de población generan que las ciudades no se expandan horizontalmente sino verticalmente. Con este crecimiento vertical se da lugar al concepto de edificaciones de altura. De acuerdo con el estándar “Contraincendios de edificios de altura” de la institución (NFPA, 2011), todo edificio con una altura mayor a 21m o 7 pisos de altura típica son considerados edificios de altura. Por lo cual se concluye que estos edificios de altura no son ajenos a la realidad del Perú, y en específico a Lima Metropolitana.

(Wood & Parker, 2013) “El libro de referencia de los edificios de altura”

En el caso de países en vías de desarrollo el material predilecto para edificios de altura es el concreto armado a diferencia de países desarrollados donde las estructuras de acero estructural son el material preferido de construcción. De acuerdo con los autores el porcentaje total de las 100 edificaciones más altas en el mundo que utilizaron acero estructural paso de un 96% en el año 1930 a solo 17% en el año 2012. Por otro lado, el concreto armado pasó de solo 9% en 1970 a un 44% de los edificios en el año 2012. Esto se observa en la Figura. 2.1. y deja en evidencia que existe un constante decremento en

la utilización del acero estructural para dar paso a un mayor empleo al concreto armado en los edificios de altura. De las estadísticas presentadas por (Wood & Parker, 2013) se observa que inclusive en países desarrollados en los que la industria acerera es avanzada, la tendencia mundial es que las edificaciones de altura cada vez más utilizan el concreto armado como material principal para el casco de la estructura. En el caso de países en vías de desarrollo, esta presencia del concreto armado es mucho más notorio debido a las limitaciones de la industria acerera en estos países. Por ejemplo, en el caso de Taiwán, más del 80% de los edificios construidos en las cinco décadas pasadas fueron construidos con concreto armado de acuerdo con (Huang, et al., 2004).

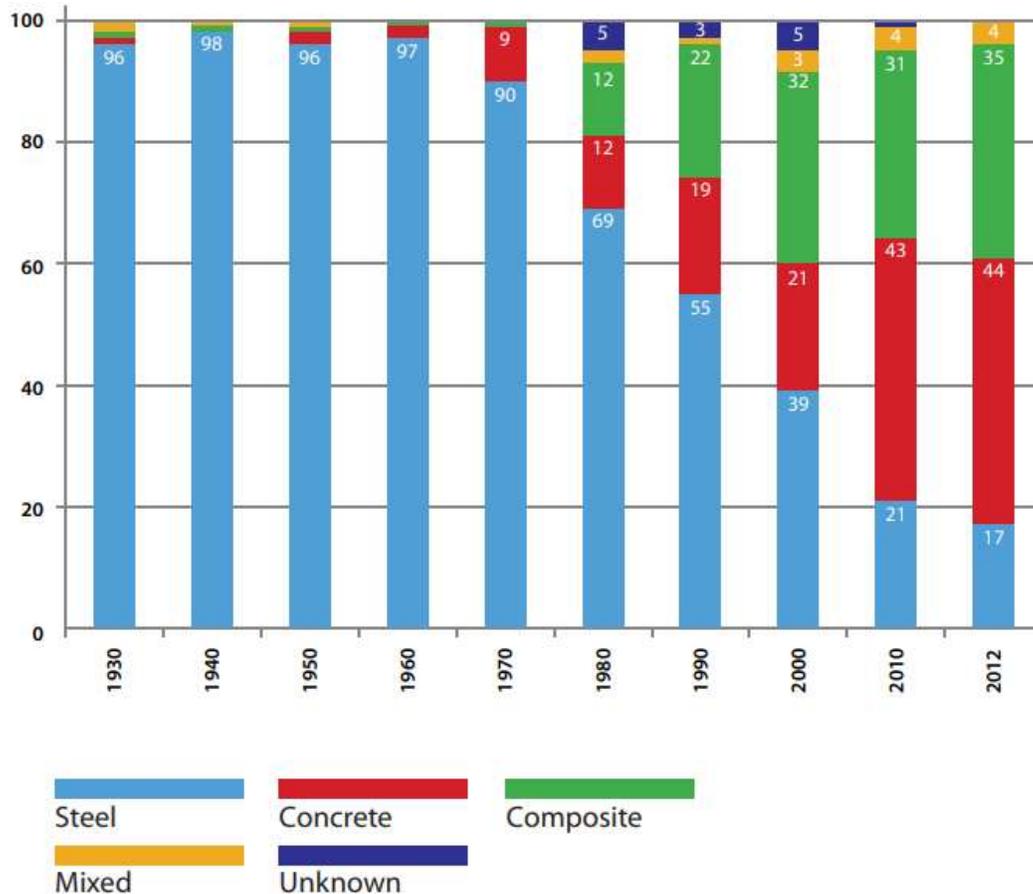


Figura 2.1. Cien edificios más altos por material

Fuente: (Wood & Parker, 2013)

(Blanco, 2010) “La evolución del concreto armado en el Perú”

El material preferido por excelencia para la construcción de edificios de altura en países en vías de desarrollo como es el caso del Perú es el concreto armado. Según la presentación del autor acerca del uso del concreto armado en el Perú, el concreto armado comenzó a utilizarse entre 1910 y 1920, teniendo una expansión en su uso después del

terremoto del 1940, luego del cual se dejó de usar los muros de adobe en la ciudad de Lima. Producto de este aprendizaje entre 1950 y 1960 se comenzó a usar más pórticos de concreto a armado y los muros rígidos de albañilería solo se utilizaron como tabiques en muchos de los nuevos proyectos. La presencia del concreto armado en edificios de altura es cada vez más notorio y en específico en países en vías de desarrollo como Perú es el material preferido.

2.1.2. Importancia del encofrado

(Johnston, 2014) “Encofrado para concreto”

En el libro del autor (Johnston, 2014), considerado la biblia verde del encofrado, se define que uno de los componentes principales del concreto armado es el encofrado; el cual representa entre el 40% y el 60% del costo del casco estructural, o alrededor del 15% del costo total de una edificación. Así mismo, el encofrado es justamente el único de los componentes del concreto armado cuyo diseño, gestión y operación depende únicamente del contratista. En la figura 2.2 se muestra la distribución típica de los costos de los componentes del concreto armado, y en específico la incidencia del encofrado en estos costos. Como se observa en la gráfica de pie el encofrado representa entre el 40% y 60%, y este porcentaje se subdivide de forma equitativa entre los materiales y la mano de obra, por lo que se concluye que los encofrados como material son igual de importantes en costo que la mano de obra necesaria para esta partida. También de la gráfica se concluye que el encofrado por sí solo es tan importante en costo como la combinación del acero de refuerzo y el concreto.

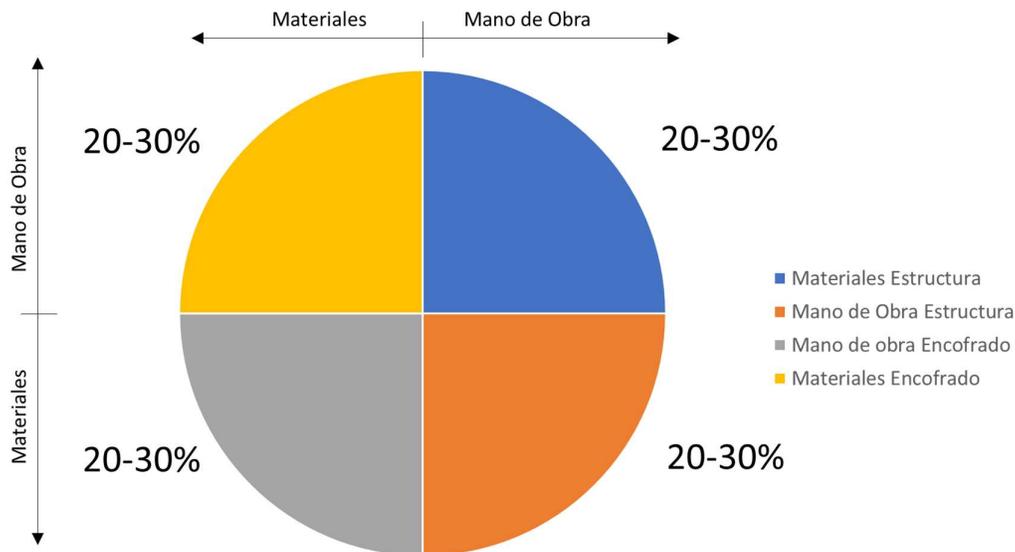


Figura 2.2. Componentes de costo del concreto.

Fuente: (Johnston, 2014)

Según (Johnston, 2014) la gestión de encofrados al igual que los proyectos tiene cinco fases en su ciclo vida (inicio, planeamiento, ejecución, control, y cierre). La fase inicio comienza con la necesidad del uso de encofrados, que va de la mano con la decisión de usar concreto armado para la estructuración del edificio. La fase planeamiento es la fase más crítica para el éxito del proyecto y de la gestión de encofrados, pues en esta se define el plan que incluye definir qué tipo de encofrado se utilizará (monolítico, losa voladora, trepante, pre armado, deslizante, etc.), el tipo de procura para adquirir dichos encofrados (alquiler, compra, leasing, etc.), el proveedor de dichos encofrados, el tipo de sistema a utilizarse (ligero, medio, pesado), la sectorización de obra, la cantidad de juegos de encofrados, la puesta máxima de encofrados, y curva de demanda o uso de encofrados. La fase planeamiento no es inerte. Durante la ejecución del plan, aún se realizan ajustes al plan de ser necesario. En la fase ejecución se ejecuta el plan e incluye todas las actividades relacionadas al encofrado como revisar la ingeniería de los planos de encofrados, revisar listas de embarque, transportar el encofrado a obra, preparar el material para su uso, ensamblarlo, acarrearlo, instalarlo, desencofrarlo y luego reutilizarlo. En la fase de monitoreo y control, el objetivo es asegurar que se está cumpliendo el plan y que se están tomando las medidas correctivas para alinear la ejecución de acuerdo con el plan en caso de desviarse. Durante el control se realizan actividades como revisar que no se está excediendo la cantidad de encofrado estimado en la curva de uso de encofrado planificada, que el encofrado está rotando adecuadamente y se está devolviendo al proveedor en el tiempo planificado. Finalmente, para la fase de cierre se consideran todas las actividades concernientes a asegurar que no existan sobre costos al momento de devolver los encofrados. Ejemplo de estos sobre costos incluyen cobros por parte del proveedor por pérdidas de encofrados, por reposición de encofrados dañados en obra, por mantenimiento no adecuado, y por limpieza de estos.

(Peurifoy & Oberleder, 2011), “Encofrado para estructuras de concreto”

En el libro los autores describen al concreto armado como el resultado de tres componentes principales: el acero de refuerzo estructural, el encofrado y por su puesto el concreto. En particular en el caso de las edificaciones casi siempre existen actividades complementarias como la instalación de canalizaciones eléctricas y sanitarias embutidas en el concreto armado. En el caso del concreto y el acero, la optimización depende directamente del diseño estructural, el cual reduce las cantidades requeridas de estos materiales. Pero en el caso del encofrado, la optimización y diseño continúa siendo responsabilidad del contratista. La optimización del encofrado tiene por finalidad minimizar la cantidad de juegos de encofrado y maximizar la rotación de estos, así mismo seleccionar los encofrados que maximicen la productividad de la mano de obra y minimicen la cantidad de personas a través del uso de equipos de acarreo. Un factor clave para reducir la mano de obra es seleccionar un encofrado con pocas piezas y que a la vez requiera lo menos posible el desarmado y rearmado de los sistemas de encofrado. Sin embargo, existen algunos criterios que se tienen en cuenta en la etapa de diseño de la estructura para optimizar los encofrados, algunos de esos puntos son: no utilizar capiteles en forma trapezoidal, uniformizar peraltes de vigas, diseñar las vigas más anchas que las columnas en los nudos, uniformizar el espaciamiento de columnas, uniformizar las dimensiones de columnas en especial si se usan formas circulares, y uniformizar la altura de entrepisos.

Así mismo, los autores (Peurifoy & Oberleder, 2011) concluyen que un correcto diseño, selección, planeamiento, preparación, ejecución, mantenimiento y control del encofrado se generan ahorros de hasta el 25% del casco estructural. En términos de tiempo, el encofrado siempre forma parte de la ruta crítica del casco de la edificación y usualmente es la actividad que tiene mayor duración en comparación a la colocación de acero y concreto. En términos de calidad cualquier defecto en el proceso de encofrado genera defectos visibles en la superficie del concreto visto y así mismo cualquier error en el proceso de desencofrado y apuntalamiento genera problemas de fisuras y deflexiones. Finalmente, en términos de seguridad el proceso de encofrado es una de las actividades con mayor participación de mano de obra y por ser construcciones temporales el riesgo a accidentes es mayor a otras actividades.

2.1.3. Procura de encofrados

(Krawczynska-Piechna, 2016), “Un análisis del criterio decisivo en el problema de selección de encofrados”

Según la publicación, típicamente los proveedores de encofrados prefabricados proveen soporte técnico, capacitaciones, entrenamiento en campo, y logística para el suministro. A diferencia de los encofrados hechos en obra que son preparados con materiales que permiten menor número de usos, la preparación de los planos de montaje, el diseño de los encofrados y cualquier soporte técnico o capacitación requerido en obra es totalmente responsabilidad única del contratista. La procura de encofrados prefabricados es más rápida debido a que no hay necesidad de habilitar las formas, a diferencia del encofrado hecho en obra que debe prepararse con madera en un taller o en el mismo terreno. Estos encofrados modulares suelen tener diseños patentados, homologados y certificados que optimizan el número de piezas requeridas reduciendo así la mano de obra a la vez que la misma necesita cada vez ser menos especializada. Por todas estas razones, los encofrados modulares prefabricados son la opción preferida hoy en día por los contratistas generales de edificaciones por sobre la opción de encofrado hecho en obra.

Los sistemas de encofrado se obtienen típicamente de cuatro formas: propiedad del contratista cuyo costo es prorrateado en cada proyecto, alquiler por un periodo específico, “leasing” en modo compra, y cualquier combinación de las anteriores. Según (Krawczynska-Piechna, 2016), menos del 6% de los contratistas tienen encofrados propios suficientes para ejecutar sus proyectos sin la necesidad de alquilar encofrado extra, y más del 40% de los contratistas rentan todo su encofrado para ejecutar proyectos. Existen muchas ventajas por las cuales los contratistas prefieren trabajar con encofrados alquilados. El contratista al alquilar encofrado requiere de una menor inversión inicial, lo cual es ideal si no se tiene un flujo continuo de proyectos similares en los que el encofrado se va a reutilizar. Al ser el encofrado alquilado existe un riesgo mucho menor en la inversión del contratista ya que de no requerirse los encofrados por problemas durante la obra, es factible devolverlos al proveedor y solo pagar por el tiempo que el encofrado fue utilizado. De esta forma no hay riesgo de tener encofrado parado por falta de proyectos. Existe mayor flexibilidad para aumentar o reducir las cantidades de encofrados requeridos en obra sin impactar severamente el costo, pues solo se alquila el encofrado a utilizarse. Una de las principales ventajas de alquilar encofrado es que se adquieren sistemas de

encofrados ideales y específicos para los tipos de proyectos que el contratista este afrontando. Esto es muy importante considerando que algunos contratistas generales ven una diversidad de proyectos y tener flexibilidad para seleccionar el encofrado ideal es una ventaja competitiva al momento de concursar para nuevos proyectos. Así mismo, al alquilar los encofrados el contratista siempre elige las tecnologías más recientes disponibles en el mercado, generando una ventaja técnica con respecto a sus competidores.

2.1.4. Métricas Lean

(Liker, 2020), “El modo Toyota: 14 principios del más grande fabricante del mundo”.

Las tres métricas presentadas por el autor (Liker, 2020) son “tiempo objetivo”, “ciclo de producción”, “tiempo de entrega”. Para ejemplificar la definición de estos términos se examinará el caso de una edificación de concreto armado de 10 pisos.

El “tiempo objetivo” o “takt time” es la producción deseada considerando máximo tiempo disponible para alcanzar la producción requerida por el cliente y se estima con la ecuación 2.1. Si consideramos que en el ejemplo propuesto del edificio de 10 pisos el cliente necesita la estructura terminada en 65 días (tiempo disponible) entonces el “tiempo objetivo” de un piso en la edificación es 6.5 días evaluando la ecuación 2.5, como se muestra en la ecuación 2.2.

$$\textit{Tiempo objetivo} = \frac{\textit{Tiempo disponible}}{\textit{Unidades requeridas para produccion (Demanda Cliente)}} \quad (2.1)$$

$$\textit{Tiempo objetivo} = \frac{65 \textit{ días}}{10 \textit{ pisos}} = 6.5 \textit{ días/piso} \quad (2.2)$$

En un tren de actividades todas las actividades están subordinadas al cuello de botella y todas avanzan a un solo ritmo de producción que sería lo que se define como un sector de trabajo por día. Es por ello por lo que en una edificación todas las actividades avanzan al ritmo del “ciclo de trabajo” o “cycle time”. El “ciclo de trabajo” es el tiempo real que un producto está en proceso. Por ello el “ciclo de trabajo” solo considera el tiempo neto de producción y debe ser por tanto menor al “tiempo objetivo”. El “ciclo de trabajo” se calcula con la ecuación 2.3. Considerando el ejemplo del edificio de 10 pisos como el “tiempo objetivo” 6.5 días para un piso y el “ciclo de trabajo” tiene que ser un numero entero de días menor al “tiempo objetivo” se determina que el “ciclo de trabajo” debe ser 6 días para un piso. Esto también implica que cada piso debe sectorizarse en 6 sectores de trabajo con aproximadamente la misma cantidad de trabajo en cada sector. Por tanto, se concluye que el tiempo de producción neto para la estructura de la edificación (sin considerar las cimentaciones o actividades anteriores) es igual a 60 días puesto que el edificio tiene 10 pisos y 6 sectores en cada piso. Luego en la expresión 2.4 se representa el cálculo del ciclo de trabajo para este ejemplo.

$$\textit{Ciclo de trabajo} = \frac{\textit{Tiempo neto de produccion}}{\textit{Numero de unidades producidas}} < \textit{Tiempo objetivo} \quad (2.3)$$

$$\text{Ciclo de trabajo} = \frac{60 \text{ días}}{10 \text{ pisos}} = 6 \frac{\text{días}}{\text{piso}} < 6.5 \text{ días/piso} \quad (2.4)$$

La tercera métrica es el “tiempo de entrega” que se considera el tiempo desde que el primer proceso de producción inicia hasta que producto esta terminado. La diferencia entre el “tiempo de entrega” y el “ciclo de trabajo” es “tiempo de desfase” o “lag time” de todas las actividades. En términos del ejemplo del edificio, el tiempo de entrega se se mide desde el inicio de la primera actividad “acero de verticales” hasta que se termina una unidad de producción. En este caso si se considera un sector de trabajo, el “tiempo de entrega” para ese primer sector es de 6 días. La ecuación 2.5 muestra la relación entre estos las tres métricas y en la ecuación 2.6. se ejemplifica los valores para el caso del edificio de 10 pisos.

$$\text{Tiempo de entrega} = \text{Ciclo de trabajo} + \text{Desfase} \quad (2.5)$$

$$\text{Tiempo de entrega} = 60\text{días} + 5 \text{ días de desfase} = 65 \text{ días} \quad (2.6)$$

En la figura 2.3 se muestra el tren de actividades del primer piso de este edificio para ejemplificar la relación entre estas tres métricas Lean. Si se analiza el caso de un sector el ciclo de trabajo es un día pues todos los días se produce un sector nuevo, pero como el tiempo de desfase es de 5 días, luego el tiempo de entrega para un sector completo es de 6 días. De forma similar si se analiza el caso de un piso el ciclo de trabajo de un piso es de 6 días y considerando el mismo tiempo de desfase de 5 días, luego el tiempo de entrega es de 11 días para un piso. Ambos ejemplos se detallan, así como la relación de las métricas en la figura 2.3.

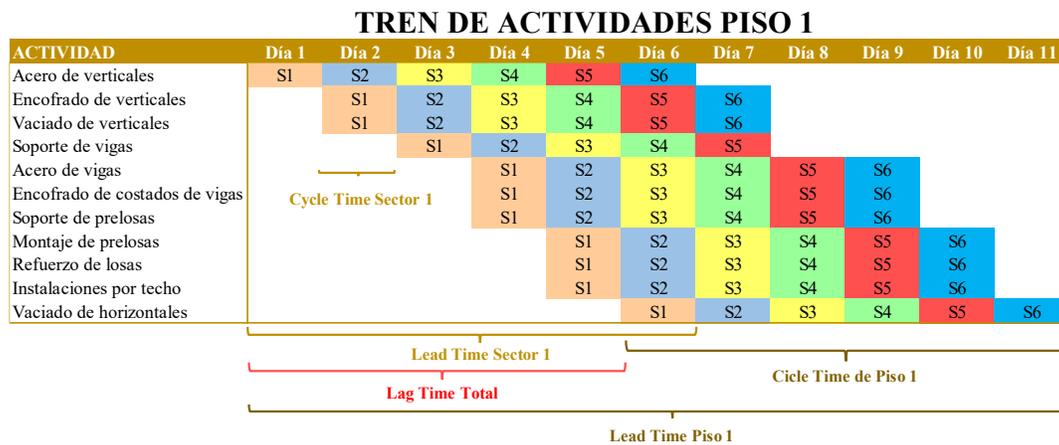


Figura 2.3. Tren de actividades de primer piso.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.5. Conceptos BIM

(Sacks, et al., 2018), “Manual BIM: Una Guía para Building Information Modeling para Propietarios, Diseñadores, Ingenieros, Contratistas, y Administradores”



En esta publicación los autores describen “Building Information Modeling” (BIM) como la metodología que utiliza de un modelo digital de una edificación para gestionar al activo a lo largo de su ciclo de vida. El modelo BIM no es solo una representación en 3D de una edificación, sino que además está alimentando de información lo cual es el componente “inteligente” del modelo. Además, los modelos son desarrollados utilizando un modelamiento paramétrico lo cual facilita que la información entre estructurada para integrar los diferentes componentes de modelo y facilitar la comunicación y extracción de información del modelo. BIM se caracteriza porque se planifica como se desarrollará el modelo en función a los usos que se le piensa dar para los interesados. Dependiendo de los usos que le quiera dar cada uno de los interesados variara como se desarrollara el modelo BIM. En la etapa de diseño al arquitecto le interesa conocer la eficiencia energética de la edificación o la huella de carbono de la edificación, o servir de herramienta para la coordinación de las diferentes especialidades en un proyecto integrado. En la etapa de construcción, al contratista le interesa identificar interferencia, comunicar de forma visual la planificación a través de simulaciones 4D, cuantificar de forma precisa cantidades y estimar costos. En la etapa de operación a los administradores de la edificación les interesa conocer que activos conforman la edificación y cuando se deben programar los mantenimientos de los principales componentes, así como toda la información provista por los proveedores pueda ser almacenada de forma eficiente en una base de datos que se conecte al modelo BIM. Los modelos BIM deben ser capaces de comunicar información, así como de asistir en la visualización durante el proceso constructivo, y determinar información necesaria para la toma decisiones partiendo del modelo.

2.1.6. Automatización BIM

(Pellegrino, et al., 2021), “Gestionando y visualizando tu información BIM”.

En el libro los autores describen el concepto de automatización BIM como el uso de programación para recrear un flujo de trabajo en una herramienta BIM sin la necesidad de que un usuario este digitando instrucciones de forma repetitiva en una herramienta de autoría BIM. Con la automatización se logra asegurar la calidad del proceso reduciendo el error humano durante los flujos de trabajo BIM. Usos comunes que se le dan hoy en día a la automatización BIM incluyen la auditoria de modelos, modelamiento automatizado desde referencias en CAD, cuantificación automática de partidas de trabajo de la edificación, documentación, interoperabilidad de archivos, intercambio de la información entre diferentes programas, y diseño generativo para evaluar diferentes alternativas s de diseño.

Existen dos alternativas para el desarrollo de herramientas de automatización. La primera se le conoce como programación visual, que por ejemplo en el caso de Autodesk el paquete de uso libre para este propósito se le conoce como “Dynamo”. Este paquete de programación visual consiste en conectar “nodos” que representan procesos dentro de una herramienta de modelamiento BIM que reciben entradas y generan salidas. Las salidas de un nodo son transferidas hacia otros nodos a través de “cables” que interconectan a otros nodos que reciben estas salidas como entradas para desarrollar un proceso. Estos nodos son habilitados con líneas de código en un lenguaje de programación como Python

y C#. En la figura 2.4 se detalla un flujo de trabajo con nodos y cables en Dynamo para Revit.

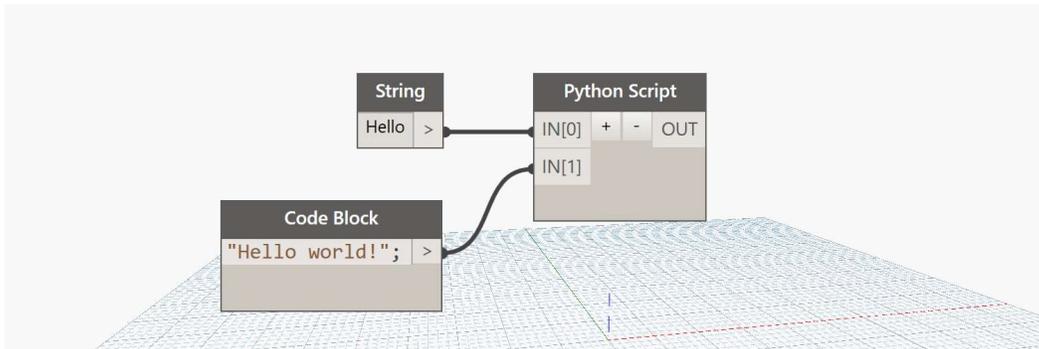


Figura 2.4. Flujo de nodos y cables en Dynamo para Revit.

Fuente: (Dynamo BIM, 2021)

La segunda alternativa para de automatización se le conoce como “Interfaz de Programación de Aplicaciones” o por sus siglas en inglés (API). Una API es un conjunto es una herramienta que es alojada por un programa anfitrión y que permite que el programa huésped utilice funciones o herramientas de la aplicación principal para generar nuevas aplicaciones o programas. Una API es un programa que utiliza las herramientas ya existentes de un programa anfitrión para crear un nuevo programa o ejecutable dentro del programa principal. También se le conoce como un “Add-in” a un programa personalizado por un programador o usuario para expandir las capacidades de un programa anfitrión. Estas “API” o “add-in” están basadas en la programación orientada a objetos utilizando lenguaje de programación como Python, y C# en combinación con una interfaz.

2.1.7. Nivel de Desarrollo (LOD)

(BIMForum, 2015), “Especificación (LOD) Nivel de desarrollo” de la definición de “Nivel de Desarrollo”

De acuerdo con la publicación, el término “Nivel de Desarrollo” o (LOD) por sus siglas en ingles es el grado de confianza que el usuario de un modelo BIM tiene en la información del modelo. Según esta manual de especificaciones, los niveles de desarrollo varían entre 100 y 500. Un nivel de especificación LOD 100, es cuando el modelo esta representado de forma genérica. En un LOD 200, un elemento está representado también de forma genérica, pero con cantidades, dimensiones, formas, ubicaciones y orientaciones aproximadas. En un LOD 300 el elemento de la edificación ya está en el modelo como un sistema específico en términos d cantidad, dimensiones, ubicación y orientación. En un LOD 350, el elemento representado en el modelo ya es específico en termino de interfaces con otros sistemas. En un LOD 350 ya se analiza las interferencias entre diferentes sistemas. En un LOD 400, le elemento además de geometría también esta provisto de información para fabricación, ensamblaje, e instalación. En un LOD 500, el

elemento es una representación fiel de como se ha ejecutado en campo, a lo que se conoce como modelo “As-built”.

En la figura 2.5 se detallan las diferentes clasificaciones de LOD para un sistema de encofrado de columna. En el LOD 100 el encofrado de columna solo es un parámetro dentro de la columna y no está representado en el modelo gráficamente. En un LOD 200 el encofrado está representado de forma genérica y ya se detalla sus dimensiones y ubicación de forma genérica. En el LOD 300 ya se ha detallado un sistema de encofrado específico, en el que se detalla que el encofrado es del tipo manu portable con cara de triplay de madera y marco de acero. En el LOD 350 ya se ha modelado las dimensiones reales del encofrado y mayores cantidades de elementos del encofrado por lo que es útil para realizar un análisis de interferencias entre los componentes y otros elementos en el modelo. En el LOD 400 ya se han incluido todos los detalles necesarios para el montaje, e instalación. En este modelo LOD 400 se han considerado todos los componentes del encofrado como son los barrotes, largueros, tensores y ferretería de accesorios. Finalmente, en el LOD 500 se ha modelado en encofrado tal cual y como se ha utilizado en obra con todo el nivel de detalle que permite representar todos los elementos del encofrado tal cual y como se ejecutó.

NIVEL DE DESARROLLO (LOD)						
	LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 350	LOD 400	LOD 500
DESCRIPCIÓN	Costo de encofrado como parámetro numerico	Encofrado de columna genérico con medidas, forma y ubicación aproximada	Diseño específico de encofrado manu portable con medidas, formas, y ubicación específica.	Encofrado real especificado por proveedor con dimensiones, forma y ubicación exacta	Encofrado incluye detalles de instalación como ferretería de accesorios.	Encofrado modelado como ejecutado en obra
REPRESENTACIÓN						

Figura 2.5. Nivel de Desarrollo (LOD) de encofrado de columna.

Fuente: Adaptado de (BIMForum, 2015)

2.1.8. Modelos BIM para encofrados

(McGraw Hill Construction, 2014), “Mercado Inteligente”.

En el estudio realizado se concluye que la construcción tiene un ineficiente uso de las tecnologías disponibles. Este estudio concluye que, en países desarrollados, alrededor del 60% de los contratistas implementan BIM en menos de un tercio de sus proyectos y menos

de la cuarta parte de sus subcontratistas de concreto utilizan BIM. Estos son números muy bajos considerando que son la realidad de países desarrollados. Por otro lado, el caso específico del Perú, según el “Primer estudio de adopción BIM en proyectos de edificaciones en Lima y Callao” realizado por (Murguía, 2018) alrededor del 60% de proyectos de edificaciones no implementan BIM o utilizan modelos BIM con un nivel de desarrollo muy bajo. Este nivel bajo de desarrollo implica que el 93% de las edificaciones que utilizan BIM, usan un modelo digital que únicamente considera volumetría 3D del concreto y por tanto no se modela el acero de refuerzo ni el encofrado. Esto genera el problema de que obtener información de los elementos no modelados no es posible. Por ello, como los encofrados no forman parte de los modelos BIM, no se cuenta con información directamente del modelo para la toma de decisiones durante la etapa de Planeamiento. Según la publicación “Optimización automatizada del diseño de encofrado a través del análisis espacial en Building Information Modeling” de los autores (Hyun, et al., 2018), el problema de estos modelos digitales es que están principalmente enfocados en los elementos permanentes, por lo que los elementos temporales como los encofrados no forman parte de estos modelos y no existe un mínimo detalle.

(Mansuri, et al., 2017), “Building Information Modeling para el uso de la herramienta de gestión de encofrados en cascada”

En esta publicación los autores identifican que existen principalmente tres razones asociadas a que los encofrados no sean incluidos como parte del modelo BIM. La primera es que los modelos de encofrados se deben preparar luego de terminado el modelo de la estructura de concreto lo que deja muy poco tiempo para desarrollar los modelos BIM de los encofrados. La segunda causa es que los proyectos usualmente tienen muchas modificaciones durante la ejecución, lo que dificulta mucho actualizar los modelos de encofrados a tiempo. Por último, muchas veces los modelos de encofrados no están terminados antes de iniciar los vaciados de concreto en el proyecto lo que muchas veces genera que estos modelos BIM se vean como innecesarios para la gestión de encofrados.

Según (Mansuri, et al., 2017) implementar un modelo BIM para los encofrados es muy laborioso y complejo, esto genera que esta herramienta no sea explotada para las etapas tempranas de la planificación de encofrados. La planificación de encofrados no se ha beneficiado debidamente de estas tecnologías y deja a los contratistas con poco tiempo e información para realizar una estimación con alta certidumbre de la cantidad de encofrado requerido en un proyecto. Así mismo los contratistas tienen en el problema de realizar un análisis apresurado de la sectorización de los vaciados de la edificación, así como de la rotación de los encofrados. Al no tener un modelo BIM, es complicado computar diferentes alternativas de sectorización y cuantificar la cantidad de encofrado requerido en el tiempo.

(Gambatese & Jin, 2019), “BIM para estructuras temporales: desarrollo de una API plugin en Revit para encofrado de concreto”.

En esta publicación los autores afirman que la práctica común es no contar con un modelo BIM, por lo que las sectorizaciones se deben realizar en un plano impreso en papel o impresión digital en PDF, o en el mejor de los casos utilizando un archivo en formato

CAD. El problema del uso de estas herramientas para la sectorización es que todo debe realizarse de forma manual lo que conlleva mucho tiempo y en muchos casos a error humano que afecta negativamente las estimaciones. Muchas veces estos archivos son complementados con hojas de cálculo en los cuales se debe digitar manualmente la información relacionada a las medidas aumentando a aun más posibilidad de error y haciendo más lento el proceso.

2.1.9. Metodologías para la toma de decisiones

(Saaty, 1980), “Proceso de Análisis Jerárquico”.

En la publicación del matemático Thomas Saaty, titulada “Proceso de Análisis Jerárquico” o por sus siglas en inglés (AHP) se presenta el modelo matemático para la toma de decisiones con múltiples alternativas y atributos. El método AHP es un proceso utilizado para la toma de decisiones, en los casos en que se tienen múltiples alternativas, pero además múltiples criterios. Usualmente en la toma de decisiones se basan en un único criterio los cuales son el costo o el tiempo, ignorando otros criterios por considerarlos menos relevantes o complicados de ponderar. Sin embargo, cuando el criterio costo es muy homogéneo entre alternativas o existen otros criterios más importantes se requiere de un método de toma de decisiones como AHP.

El primer paso del método AHP es expresar el problema de decisión en una jerarquía de elementos. La jerarquía principal o más alta es la meta del problema de decisión y la forma más general en la que se expresa el problema. La segunda jerarquía se descompone de la principal y se le conocen como submetas, criterios u objetivos. En este nivel se va de lo general a lo específico. Cada uno de los criterios se subdivide en un nivel apropiado de detalle, teniendo en cuenta que, a mayor cantidad de criterios y subcriterios, menor será la importancia de cada criterio y/o subcriterio. En el último nivel de la jerarquía se encuentran las alternativas que serán evaluadas en base a cada uno de los criterios y en combinación se decidirá la mejor alternativa para la meta principal. En la forma más simple de esta estructura hay solo 3 niveles, la meta, los criterios y las alternativas. La figura 2.6 muestra un esquema de esta jerarquía, con un nivel 1 para la meta, un nivel 2 de los criterios ($i=1, 2, \dots, m$), y en el nivel 3 las alternativas ($j = 1, 2, \dots, n$).

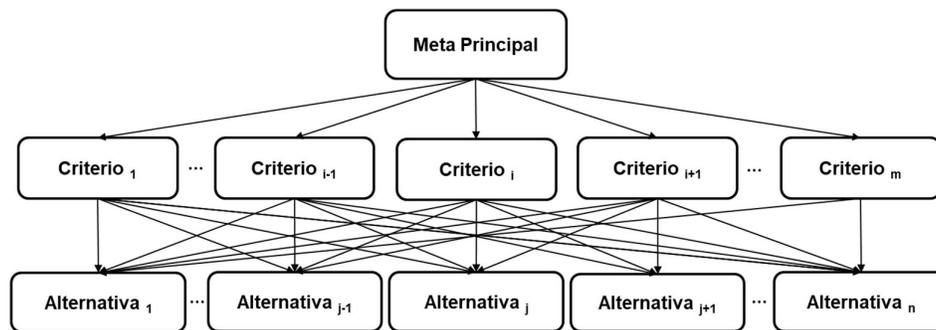


Figura 2.6. Jerarquía AHP de metas, criterios y alternativas.

Fuente: Adaptado de (Saaty, 1980)

El segundo paso es elaborar la “Matriz de Comparación por Pares” (MCP) de las alternativas para cada uno de los criterios estableciendo una puntuación de acuerdo con la escala de Saaty la cual se presenta en la tabla 2.1. Los valores 2, 4, 6, 8 son valores intermedios. El valor 1 siempre se asigna cuando la comparación se realiza con la misma la misma alternativa y los valores recíprocos (1/9, 1/7, 1/5, 1/3, ...) se asignan cuando la segunda alternativa es mejor que la primera.

Tabla 2.1. Escala de evaluación de Saaty.

Fuente: Adaptado de (Saaty, 1980)

JUICIO VERBAL	EQUIVALENCIA NUMÉRICA
Extremadamente muy importante	9
Entre muy fuerte y extremadamente muy importante	8
Muy fuertemente más importante	7
Entre fuertemente y muy fuertemente más importante	6
Fuertemente más importante	5
Entre moderada y fuertemente más importante	4
Moderadamente más importante	3
Entre igual y moderadamente más importante	2
Igual de importante	1

El tercer paso es obtener la “Matriz Normalizada” (MCN) dividiendo cada numero de la columna de la matriz de comparación por la sumatoria de los valores en la columna. El paso 4 es formar el “Vector Prioridad” para cada uno de los criterios calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. El promedio por fila representa el vector prioridad de la alternativa con respecto a cada uno de los criterios seleccionados. Este paso se repite para cada uno de los criterios. La consistencia de las evaluaciones asignadas en la matriz de comparación por pares se determina utilizando el cociente de consistencia (CR). Un CR menor a 0.1 es aceptable, mientras que un CR mayor a 0.1 implica que las evaluaciones deben reconsiderarse. Los pasos del 2 al 5 deben repetirse para cada uno de los criterios y los resultados del paso 4 son integrados a la “Matriz de Prioridad”, en la cual las filas representan a las alternativas y las columnas los criterios de evaluación. También se debe elaborar la “Matriz de comparación por Pares” de los criterios de forma similar a como se hizo para las alternativas. Finalmente se debe elaborar el “Vector de Prioridad Global” multiplicando el vector prioridad de los criterios por la matriz de prioridad de las alternativas.

Para la determinación del cociente de consistencia primero se debe determinar la suma ponderada de cada línea de la matriz de comparación por pares de las alternativas. Luego para cada línea se debe dividir por la suma ponderada de su alternativa correspondiente. De todos estos valores se obtiene la media y se le conoce como λ_{max} . El índice de consistencia se calcula para cada alternativa haciendo uso de la ecuación 2.7.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.7)$$

Luego en función al número de alternativas y a la tabla 2.2 se determina el índice de consistencia RI. Finalmente, el cociente de consistencia (CR) se calcula con la ecuación 2.8. Los valores de CR deben ser menores los valores presentados en la tabla 2.3.

$$CR = CI/RI \quad (2.8)$$

Tabla 2.2 Valores propuestos para el índice de consistencia (RI).

Fuente: (Saaty, 1980)

Índice de consistencia aleatorio										
Total de Alternativas (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49

Tabla 2.3. Índices aleatorios para Cociente de Consistencia.

Fuente: (Saaty, 1980)

Tamaño de matriz (n)	Ratio de consistencia (CR)
3	5%
4	9%
5 ó mayor	10%

2.2. Marco conceptual

Automatización: Proceso de repetir una serie de pasos en una herramienta de autoría BIM de forma automática, programada, repetitiva y sistemática con el objetivo de reducir errores humanos y maximizar el eficiente uso de los recursos.

Generativo: Se refiere al proceso de realizar un diseño iterativo en el cual se obtiene una gama de diseños o soluciones de las cuales se identifica la solución óptima en base a una serie de restricciones. Al ser un diseño automatizado se genera una cantidad de alternativas de diseño mucho mayor que un diseño tradicional.

Evaluación: Proceso de representar un conjunto de propuestas de cotización con los mismos criterios y componentes de costo de tal forma que todas sean equivalentes para compararlas sin generar un sesgo y obtener una decisión objetiva del análisis comparativo luego de la evaluación.

Modelo: Una interpretación de la palabra modelo se refiere al modelo 3D digital que contiene información necesaria de los entregables del activo para la gestión de la construcción, así como del resto de etapas del ciclo de vida de la edificación. Otra interpretación se refiere al modelo matemático para evaluar propuestas de encofrados, se refiere a la metodología o conjunto de algoritmos y herramientas propuestas en la investigación para emplear tecnologías BIM y métricas Lean para cuantificar metrados, estimar costos, definir tiempos y computar indicadores para la gestión de encofrados.



Modular: Se refiere al tipo de encofrado que tiene medidas preestablecidas y estándares que permiten reutilizarse en diferentes sectores de vaciado para encofrar elementos similares, pero con medidas diferentes.

Puesta: Se refiere a la cantidad de encofrado requerido en un tiempo específico del proyecto. Se expresa en metros cuadrados requeridos de una solución de encofrados. La puesta máxima es la cantidad máxima de encofrado requerido en todo el proyecto.

Rotación: Se refiere al esquema de reúso de los diferentes encofrados cuando son desmontados de un sector de vaciado para ser reinstalados en un nuevo sector de vaciado. Se usa el termino rotación para definir la forma en que los encofrados son reusados a lo largo de diferentes sectores de vaciado.

Sistema: Se refiere al conjunto de piezas y componentes de encofrado que están diseñado para cumplir una función específica en conjunto, y por tanto ninguna de sus piezas es modificada o reemplazada sin poner en riesgo la estabilidad y capacidad de todo el sistema.

Solución: Se refiere al diseño de encofrado propuesto por un proyectista de encofrados para resolver un uso específico de encofrado y que no se utiliza para ningún otro uso.

Frente: Se refiere al conjunto de recursos en un proyecto que trabajan a un ritmo independiente del resto del proyecto y sin compartir sus recursos.

Sector: Se refiere a la mínima unidad de producción de un frente de trabajo en la mínima unidad de tiempo. En construcción esta mínima unidad de tiempo es un día o jornada y el sector es la cantidad de trabajo producido por una cuadrilla o grupo de trabajo en ese turno.

Nudo: Se refiere a la intersección de un elemento horizontal con otro elemento vertical. Por ejemplo, la intersección de una columna con una viga, o de una placa con una losa.

Constructibilidad: Se refiere a la evaluación del diseño del producto pensando en la eficiencia durante la etapa de su construcción. Se define como diseñar el producto pensando también en la eficiencia del proceso.



CAPÍTULO III: HIPOTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

En el presente capítulo se presentan la hipótesis principal y dos hipótesis secundarias de la tesis.

3.1.Hipótesis principal

Un modelo de decisión multi alternativa mejorará la evaluación de proveedores de encofrados.

3.1.1. Variable dependiente

Evaluación de proveedores de encofrados.

3.1.2. Variable independiente

Modelo de decisión multi alternativa.

3.2.Hipótesis secundaria

Un modelo basado en tecnologías BIM y métricas Lean mejorará la confiabilidad de las estimaciones de encofrados.

3.2.1. Variable dependiente

Confiabilidad de las estimaciones de encofrados.

3.2.2. Variable independiente

Modelo basado en tecnologías BIM y métricas Lean.

3.3.Hipótesis secundaria

Nuevos indicadores de desempeño permitirán mejorar el bajo rendimiento de rotación de los encofrados.

3.3.1. Variable dependiente

Rendimiento de la rotación de encofrados.

3.3.2. Variable independiente

Indicadores de desempeño de encofrados.



CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de la presente investigación respecto al enfoque es aplicado, porque está basado en la metodología BIM y la filosofía Lean Construction pero contextualizado en la evaluación de proveedores de encofrados. El enfoque de la investigación se basa en emplear modelos BIM a través de la automatización con programación gráfica. La investigación se basa en la toma de datos de simulaciones realizadas en un programa de autoría BIM (Revit), para diseñar una herramienta que permita estimar con precisión la cantidad de encofrado requerido, y luego evaluar las propuestas de los proveedores de encofrados. La tesis propone basarse en las métricas “Lean” pero contextualizadas a la gestión de encofrados para diseñar indicadores de desempeño del uso de encofrados que mejoren la rotación de los encofrados.

El tipo de la presente investigación respecto al alcance es exploratorio, porque se utilizan simulaciones con 3 modelos digitales primero a un nivel general y luego a un nivel específico en un proyecto real. El primer punto de control es la calibración a modo de prueba de la herramienta de cuantificación de encofrados y estimación de costos utilizando dos modelos de diferente número de pisos, pero con similar distribución en planta y con la misma área techada. De ambos modelos se espera que los metrados sean muy similares ya que, al tener una modulación típica y una misma área techada, se espera tener valores similares de área de encofrado a pesar de tener diferente número de pisos. En un segundo punto de control se utilizará un proyecto de edificaciones real para validar el modelo diseñado para evaluar encofrados y realizar la identificación de la alternativa óptima.

El diseño de la presente investigación es experimental, porque para la tesis se experimentó con simulaciones con 2 modelos diferentes que sirvieron para la toma de datos respecto a cuantificación de encofrados de forma automatizada, estimación de tiempos y costos automatizados para determinar los requerimientos de alquiler de encofrados, y cómputo de indicadores de desempeño de forma automática. Se experimentó con un tercer modelo que simuló un proyecto real existente y se utilizó los resultados de la herramienta de automatización para generar los costos que servirán de entrada en el modelo propuesto en la tesis para evaluar a los proveedores de encofrados.

4.2. Unidad de análisis

Para la presente tesis se consideró 2 modelos digitales BIM y un proyecto real en el cual se validó únicamente el uso de la herramienta “Proceso de Análisis jerárquico” o por sus siglas en inglés (AHP). Los dos primeros modelos son edificaciones que han sido proyectadas únicamente con el propósito de realizar las pruebas con el modelamiento y obtener los resultados correspondientes a la estimación de costos del encofrado, y para obtener los indicadores de desempeño propuestos en la presente investigación. Se han diseñado estos dos modelos con geometría sencilla y de arquitectura similar (misma distribución en planta de la unidad de sectorización) para validar la precisión del modelo

de cómputo. El proyecto real es una edificación existente que se ha utilizado para realizar la prueba de la herramienta de AHP. Al ser este un proyecto real se obtuvo los costos reales del encofrado como datos de entrada en la herramienta AHP.

El primer modelo BIM es una edificación de cinco pisos de altura y con un área techada de $46,550 \text{ m}^2$. Este modelo representa un centro comercial típico. Este modelo se planificó con 16 sectores de trabajo por cada piso y un total de 80 sectores de vaciado. Se diseñó el modelo considerando una altura típica de 4.50 m de entrepiso, lo cual hace que la altura total de la edificación sea de 22.50 m. Debido a que la edificación tiene 16 sectores por planta, el ciclo de trabajo para un piso es de sólo 16 días. El tiempo de desencofrado para los horizontales considerado es 7 días y se consideró 12 juegos de encofrados para los horizontales. La figura 4.1 detalla el modelo BIM de 5 pisos.

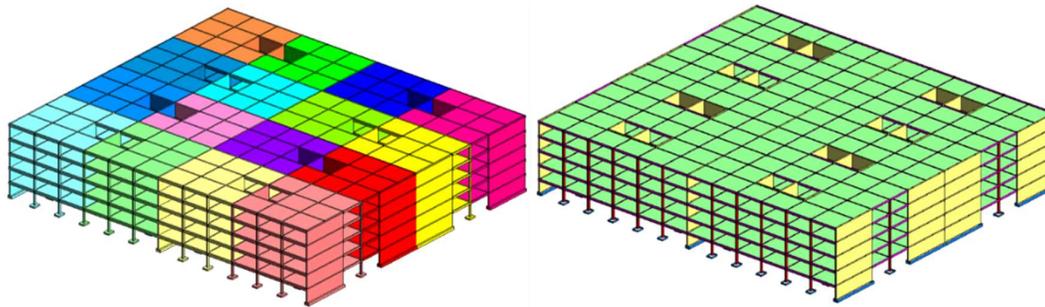


Figura 4.1. Modelo BIM de edificio de 20 pisos y 80 sectores

Fuente: Elaboración propia

El segundo modelo BIM es una edificación de veinte pisos de altura y con un área techada también de $46,550 \text{ m}^2$. Este modelo representa una edificación típica de oficinas. Este modelo se planificó con cuatro sectores de trabajo por cada piso y un total de 80 sectores de vaciado. Se diseñó el modelo considerando una altura típica de 4.50 m de entrepiso, lo cual hace que la altura total de la edificación sea de 90 m. Debido a que la edificación tiene 4 sectores por planta, el ciclo de trabajo para un piso es de sólo 4 días. El tiempo de desencofrado para los horizontales considerado es 7 días y se consideró 12 juegos de encofrados para los horizontales. La figura 4.1 detalla el modelo BIM de 20 pisos.

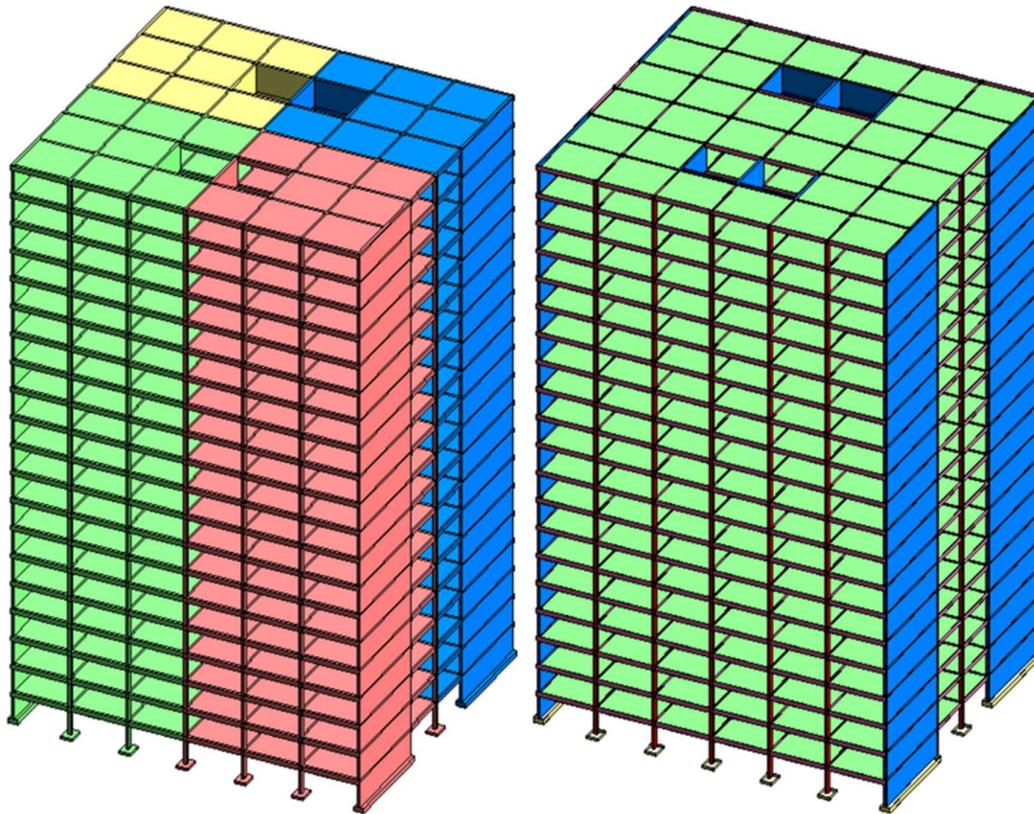


Figura 4.2. Modelo BIM de edificio de 20 pisos y 80 sectores

Fuente: Elaboración propia

El tercer análisis es de la edificación existente “Neo 10” ubicada en el cruce de la Av. Diez Canseco con la Vía Expresa en el distrito de Miraflores. El proyecto es de la empresa inmobiliaria Viva GyM y está compuesto por 3 torres que albergan 117 departamentos. El proyecto contempla las tres torres alrededor de un parque que es el espacio común del edificio que funciona como espacio de circulación. El proyecto además cuenta con una piscina techada, gimnasio y salón de usos múltiples (SUM). Esta distribución de las torres permite que todos los departamentos del edificio se beneficien de una buena vista. Por este motivo es que todos los departamentos tienen vista a la Av. Paseo de la República o al parque interior.

El proyecto tiene un área techada total de aproximadamente $20,000\text{m}^2$. Los sótanos tienen un área techada aproximada de $6,800\text{m}^2$, con 4 sótanos, cada sótano con un área promedio de $1,700\text{m}^2$. La primera torre tiene 17 pisos de altura con un área techada total de $8,500\text{m}^2$ y cada piso con un área promedio de 500m^2 . La segunda torre tiene $3,995\text{m}^2$ con 17 pisos y un área techada promedio de 235m^2 por piso. La tercera torre tiene un área techada de 705m^2 , con 3 pisos y un área techada promedio de 235m^2 por cada piso. En el planeamiento se ha considerado 9 sectores de 189m^2 por sótano y en la torre 5 sectores de 150m^2 promedio de área techada. En la figura 4.2 se muestra una vista del modelo renderizado del proyecto NEO 10.



Figura 4.3. Modelo renderizado del Proyecto NEO 10

Fuente: Renderizado de Viva GyM

4.3. Matriz de consistencia

Título: Sistema de automatización basado en “Building Information Modeling” (BIM) y Lean para evaluar proveedores de encofrados en proyectos de Edificaciones.

A continuación, en tabla 4.1 se muestra la matriz de consistencia del presente trabajo.

Tabla 4.1. Matriz de consistencia

Fuente: Elaboración propia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE
Problema Principal				
Objetivo Principal				
¿Qué factores influyen en una deficiente evaluación de proveedores de encofrados durante la etapa de planeamiento?	Formular un modelo de decisión multi alternativa para mejorar el deficiente proceso de evaluación de proveedores de encofrados durante la etapa de planteamiento.	Un modelo de decisión multi alternativa mejorará la evaluación de proveedores de encofrados.	Evaluación de proveedores de encofrados.	Modelo de decisión multi alternativa
Problemas Secundarios				
Objetivos Secundarios				
¿Qué factores influyen en una baja confiabilidad de las estimaciones de encofrados en la etapa de planificación?	Analizar el modelo basado en tecnologías BIM y métricas Lean para mejorar la baja confiabilidad de las estimaciones de encofrados en la etapa de planeamiento.	Un modelo basado en tecnologías BIM y métricas Lean mejorará la confiabilidad de las estimaciones de encofrados.	Confiabilidad de las estimaciones de encofrados	Modelo basado en tecnologías BIM y métricas Lean
¿Qué factores influyen en un bajo rendimiento de la rotación de los encofrados en la etapa de planteamiento?	Formular indicadores de desempeño para mejorar el bajo rendimiento de la rotación de encofrados desde la etapa de planeamiento.	Nuevos indicadores de desempeño mejorarán el bajo rendimiento de rotación de los encofrados.	Rendimiento de la rotación de encofrados	Indicadores de desempeño de encofrados

CAPÍTULO V: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se desarrolla el trabajo de la investigación utilizando el modelo propuesto basado en BIM/Lean pero contextualizado la gestión de los encofrados. El capítulo inicia con una breve presentación de los conceptos propuestos por el autor para la gestión de encofrados. Luego se ejecuta la recolección de datos utilizando el modelo BIM/Lean con automatización. En la última sección del presente capítulo se ejecuta el procesamiento de la información utilizando el modelo de evaluación de propuesta de proveedores de encofrados.

5.1. Propuesta de gestión de encofrados

En esta primera sección se desarrollan conceptos propuestos por el autor para diseñar el modelo BIM/Lean propuesto. Conceptos presentados en esta sección están relacionados con la gestión de encofrados e incluyen términos como sistemas de encofrados, y soluciones de encofrados. El campo de estudio de la investigación está orientado únicamente a sistemas de encofrados modulares y prefabricados en la modalidad de alquiler por solución. Generalmente los proveedores de encofrados cotizan estas soluciones de encofrados en unidades monetarias por metro cuadrado de área de contacto (USD\$/m²).

5.1.1. Sistemas de encofrados

Un sistema de encofrado como un conjunto de piezas de encofrado que trabajan en forma conjunta para un uso específico, y que como sistema no se debe modificar, reemplazar u omitir piezas ponen en riesgo la calidad y/o seguridad de la estructura encofrada o apuntalada. Un sistema de encofrados está diseñado para ser usado únicamente con las piezas especificadas en los planos de montaje. Los encofrados suelen ser modulares para ser reutilizados en obra en diferentes sectores de vaciado o inclusive en múltiples proyectos. Los sistemas de encofrado se clasifican como prefabricados o preparados en obra. Los encofrados prefabricados suelen ser de un material resistente que permite tener muchos usos, y suelen tener certificaciones que dan garantía de funcionamiento de cada una de sus piezas y de todo el sistema.

Los sistemas de encofrados son diversos, y están diseñados para su uso específico, por lo que no deben utilizarse para otras aplicaciones sin una previa revisión por un calculista. En la figura 5.1 se detalla una adaptación de (Jimenez, 2020) en la cual se clasifican los principales sistemas de encofrados disponibles en el mercado y más comunes en el Perú. Los sistemas detallados en la figura están descritos de forma general y cada proveedor de encofrados se refiere a cada uno de estos sistemas con nombre diferentes.

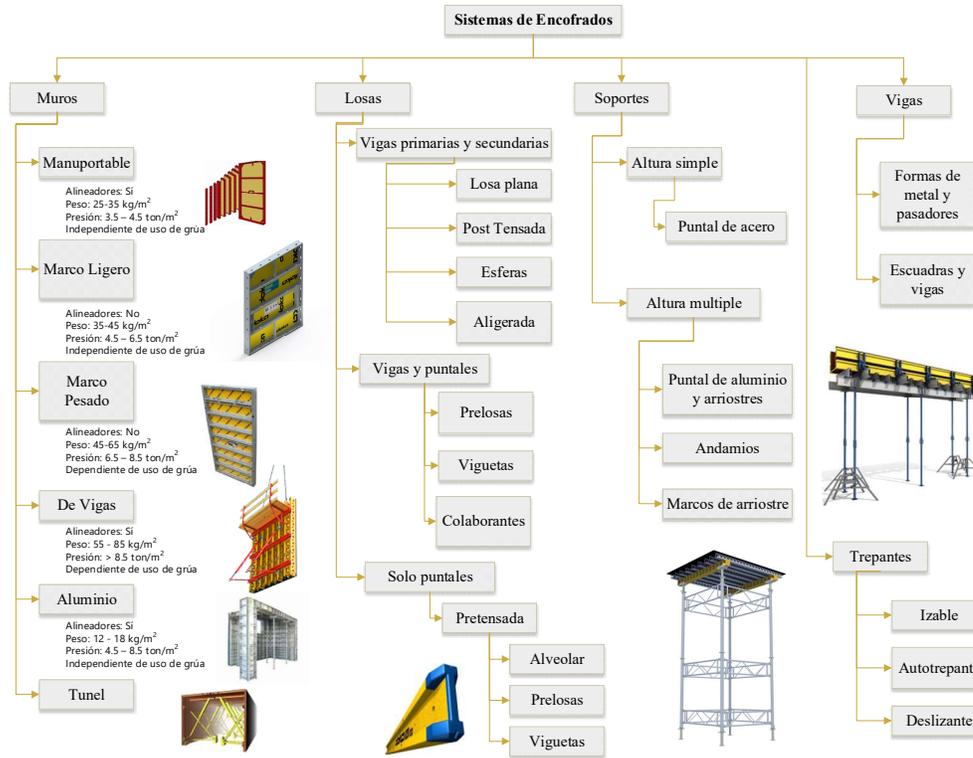


Figura 5.1. Sistemas de Encofrados

Fuente: Adaptado de (Jiménez, 2020)

Si el contratista ya ha definido trabajar con encofrados modulares prefabricados, y optar por la opción de rentar estos encofrados, el siguiente paso es solicitar cotizaciones a las empresas especializadas de encofrados. Es muy importante al momento de solicitar estas cotizaciones que se evalúen las propuestas desde el punto de vista técnico, de alcance, económico y contractual. Desde el punto de vista técnico se debe ser muy claro en las condiciones de trabajo como velocidad de vaciado que afectará directamente la presión lateral del concreto en elementos verticales, la altura de apuntalamiento que afectará los sistemas de arriostre lateral, las cargas de trabajo durante el vaciado que afectarán la capacidad portante de los puntales, así como sus arriostres, y los tiempos de desencofrado, y retiro de apuntalamientos que definirán la cantidad de juegos de encofrado. Es importante que un especialista en el diseño de encofrados haga un juicio responsable de las condiciones de trabajo, de la mano con códigos, normas y estándares de diseño. Así mismo que en conjunto con el constructor se discutan los detalles y necesidades de trabajo.

Desde el punto de vista del alcance es importante que todos los postores durante la cotización incluyen los mismos requerimientos para atender las necesidades de trabajo. Ejemplo de consideraciones de alcance incluyen puntos como accesorios de izaje, accesorios de vaciado, plataformas de trabajo, barandas de seguridad, obturadores para cisternas, escaleras de acceso, sistemas de acarreo, compuertas de acceso, etc. No todos

los proveedores trabajan con los mismos sistemas complementarios de encofrado por lo que el precio se debe evaluar para seleccionar al proveedor indicado.

Desde el punto de vista contractual las condiciones de alquiler deben ser claras y consideradas al momento de la evaluación ya que cada postor presenta propuestas distintas al momento de concursas. Puntos para considerar incluyen penalidades por perdida de piezas, o por reposición de material dañado e irreparable, costos por limpieza de encofrado entregado en malas condiciones, costos por mantenimiento para encofrados dañados durante el uso, y costos de transporte. Así mismo hay condiciones contractuales llamadas “acuerdos comerciales” que deben ser consideradas al momento de seleccionar al mejor postor. Ejemplos de estos acuerdos comerciales incluyen periodos de gracia para reducir una semana el tiempo de alquiler entendiendo que existe un periodo de transporte que el encofrado no está siendo utilizado por el contratista, descuentos comerciales de las tarifas y penalidades, etc.

5.1.2. Opciones de alquiler de encofrado

Las dos opciones más comunes de representar la tarifa de alquiler de los encofrados son indicando el precio de cada pieza en términos de dinero por unidad de tiempo (USD\$/unidad-mes) o indicando el precio en términos de dinero por unidad de área de contacto con el concreto o superficie húmeda por unidad de tiempo (USD\$/m²-mes). La segunda opción de representar la tarifa de alquiler es preferida tanto por arrendadores como arrendatarios debido a que permite expresar en una unidad común, única y sencilla la tarifa de alquiler de todos los postores sin importar el tipo de sistema, cantidad de piezas o denominaciones específicas de cada proveedor. En la figura 5.2 se muestra algunos de los principales sistemas de encofrados junto a las unidades correspondientes para representar las tarifas de alquiler de forma homologada.

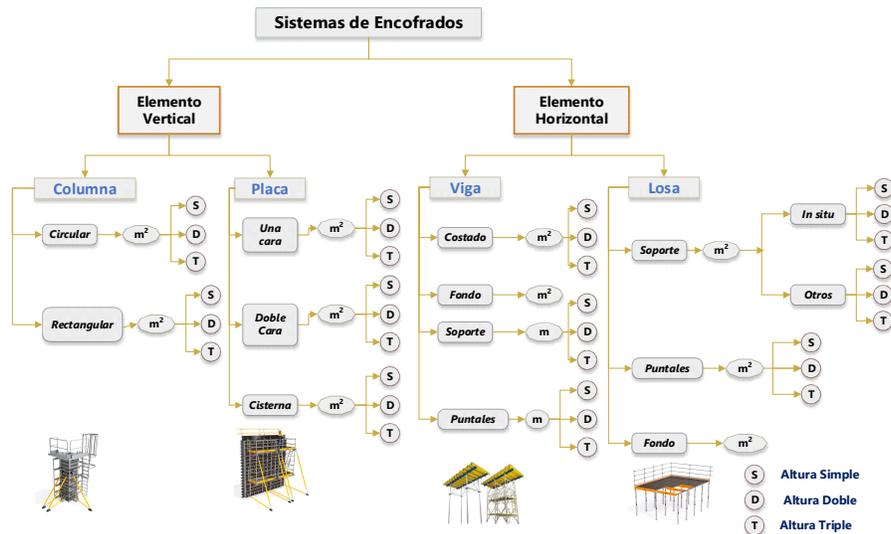


Figura 5.2. Unidades de alquiler para sistemas de encofrados.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2 representa de forma general los sistemas de encofrados sin embargo los precios se disgregan de forma más específica. Por ejemplo, las tarifas para elementos verticales se disgregan según la altura de los elementos, esto debido a que los precios varían de acuerdo con la velocidad de vaciado y presión del concreto. Tanto columnas como placas dependen de la altura y sección del elemento. Un elemento alto y de sección pequeña como una columna tiene una velocidad de vaciado mayor que una placa y por tanto está sometida a mayores empujes del concreto. Por otro lado, las placas pueden encofrarse por ambas caras, así como solo por una cara, lo que se conoce como vaciado a contramuro. También existen soluciones especiales en las que se deben considerar accesorios o consumibles específicos como en el caso de una cisterna en el cual se consideran obturadores para evitar el paso del agua por los orificios de los pasadores. La tabla 5.1 muestra algunos ejemplos de los posibles sistemas a cotizar en una evaluación de proveedores de encofrados para columnas. Las columnas circulares se detallan a nivel de altura e inclusive diámetro ya que las formas con diámetros mayores suelen ser más costosas y escasas.

Tabla 5.1. Sistemas de encofrados para columnas.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de sistema	Unidad
Encofrado de columna rectangular ($h \leq 3.60\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de columna rectangular ($3.60\text{m} < h \leq 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de columna rectangular ($h > 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de columna circular ($h \leq 3.60\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de columna circular ($3.60\text{m} < h \leq 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de columna circular ($h > 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes

De forma similar la tabla 5.2 detalla algunos de los principales sistemas a considerar para placas. Las placas al igual que columnas se disgregan en función de las alturas, en algunos casos en función del espesor, pero también principalmente soluciones especiales como muros a una cara, y muros para cisterna (por los obturadores). Usualmente el encofrado de muros de concreto armado y placas es indistinto si los espesores son similares. Los rangos de precios no suelen ser muy diferentes, siendo los muros usualmente más económicos.

Tabla 5.2. Sistemas de encofrados para placas y muros.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de sistema	Unidad
Encofrado de placa doble cara ($h \leq 3.60\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de placa doble cara ($3.60\text{m} < h \leq 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de placa doble cara ($h > 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de placa a una cara ($h \leq 3.60\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de placa a una cara ($3.60\text{m} < h \leq 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de placa a una cara ($h > 6.70\text{m}$)	\$/ m ² -mes
Encofrado de placa para cisterna ($h = X$)	\$/ m ² -mes

El caso de las vigas es en el cual existe mayor diversidad de clasificaciones. En el caso de las vigas los sistemas dependen fundamentalmente de dos características. La primera es la altura de apuntalamiento de la viga, medida desde la base del soporte y el fondo de la viga, o simplemente la altura libre por debajo de la viga. La segunda característica es el peralte de la viga, considerado desde el fondo de losa hasta fondo de viga o el peralte que cuelga de la viga. La tabla 5.3 es una propuesta de un posible desglose de precios de encofrados. Los sistemas de encofrados están usualmente compuestos por tres subsistemas: soportes de viga, fondos de vigas y costados de vigas.

Tabla 5.3. Sistemas de encofrado de vigas.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de sistema	Unidad
Soporte de viga ($h \leq 3.60m$)	\$/ ml-mes
Soporte de viga ($3.60m < h \leq 6.70m$)	\$/ ml -mes
Soporte de viga ($h > 6.70m$)	\$/ ml -mes
Costado de viga, con peralte ($P \leq 0.40m$)	\$/ m ² -mes
Costado de viga, con peralte ($0.40m < P \leq 0.7m$)	\$/ m ² -mes
Costado de viga, con peralte ($0.70m < P \leq 1.0m$)	\$/ m ² -mes
Costado de viga, con peralte ($P \geq 1.0m$)	\$/ m ² -mes
Fondo de viga metálico	\$/ m ² -mes
Fondo de viga fenólico	\$/ m ² -mes

Finalmente, en el caso de losas la clasificación es simple y se basa únicamente en la altura de luz libre o la altura medida desde la base de los soportes hasta el fondo de losa como se muestra en la tabla 5.4. El sistema de encofrado de losa está compuesto por los soportes y los fondos, los fondos son usualmente las planchas de triplay fenólico que es una compra realizada por el contratista.

Tabla 5.4. Sistemas de encofrados de losa.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de sistema	Unidad
Soporte de losa ($h \leq 3.60m$)	\$/ ml-mes
Soporte de losa ($3.60m < h \leq 6.70m$)	\$/ ml -mes
Soporte de losa ($h > 6.70m$)	\$/ ml -mes

5.2. Hoja de ruta para el desarrollo del trabajo de investigación

El desarrollo de la presente tesis cuenta con dos fases para su desarrollo. La figura 5.3 detalla los pasos que conforman el proceso de investigación con el modelo diseñado en la tesis. La primera fase consiste en la recopilación de datos utilizando modelos BIM del encofrado genérico LOD 200. La segunda fase consiste en el procesamiento de la información con el modelo de evaluación multi alternativas y los indicadores de desempeño propuestos en esta investigación.

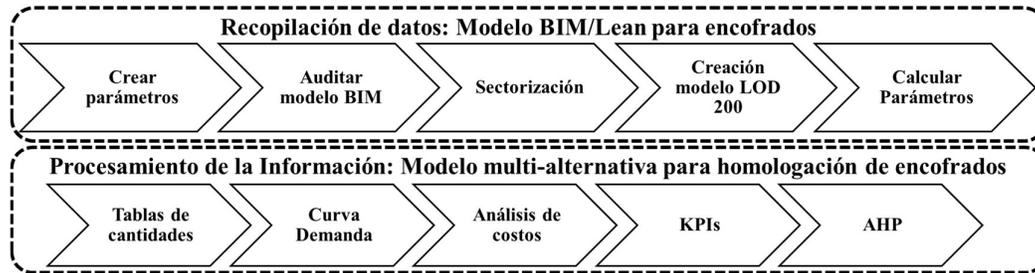


Figura 5.3. Hoja ruta modelo.

Fuente: Elaboración propia

5.3. Recopilación de datos utilizando el modelo BIM/Lean

La primera fase está compuesta de cinco pasos para la creación del modelo BIM a un nivel de desarrollo LOD 200. El primer paso de esta fase consiste en la creación automatizada de los parámetros BIM. El segundo paso consiste en el diseño de un flujo de trabajo automatizado en Dynamo para la auditoría del modelo BIM de la edificación. El tercer paso consiste en el desarrollo del algoritmo matemático a emplearse para realizar la sectorización del modelo BIM de una edificación considerando las métricas “Lean” así como el criterio de reducción de horas hombre para la ejecución del tren de actividades de la etapa de estructuras. El cuarto paso es la creación del modelo BIM a un nivel de desarrollo LOD 200 para los encofrados que servirán para ejecutar la sectorización de vaciados propuesta en el paso anterior. El último paso de la primera fase consiste en calcular los valores para cada uno de los parámetros creados en el primer paso de esta fase. Los valores calculados son almacenados en los parámetros de cada uno de los elementos de concreto armado correspondientes del modelo BIM de la edificación.

5.3.1. Creación de parámetros BIM automatizada

Un parámetro BIM es un contenedor de información que almacena un tipo de data asignándola a un elemento o componente dentro del modelo BIM. Cada instancia, tipo de elemento, familia, y categorías cuenta con parámetros. Los programas de autoría BIM son considerados herramientas de modelamiento paramétrico o modelamiento orientado a objetos debido a que se utilizan estos parámetros (geométricos y no geométricos) para modelar los objetos que conforman el modelo de la edificación. La figura 5.4 señala un ejemplo de la relación de estos conceptos de las clases y subclases en un entorno BIM. La categoría en la entidad seleccionada es “Doors”. Este elemento seleccionado es de la categoría puertas. La categoría puertas agrupa un conjunto de familias de puertas. En este caso el tipo de puerta seleccionada es de la familia “Pocket_Slider_Door_5851” que es una familia de puertas corredizas. Dentro de esta familia existen múltiples tipos de puertas en este caso la seleccionada se refiere al tipo “2.027x0.945”, que el nombre dado a la puerta que justamente tiene esas dimensiones de alto por ancho. Finalmente, la instancia es el elemento insertado en el proyecto o modelo BIM y que pertenece al tipo, familia y categoría antes mencionadas.

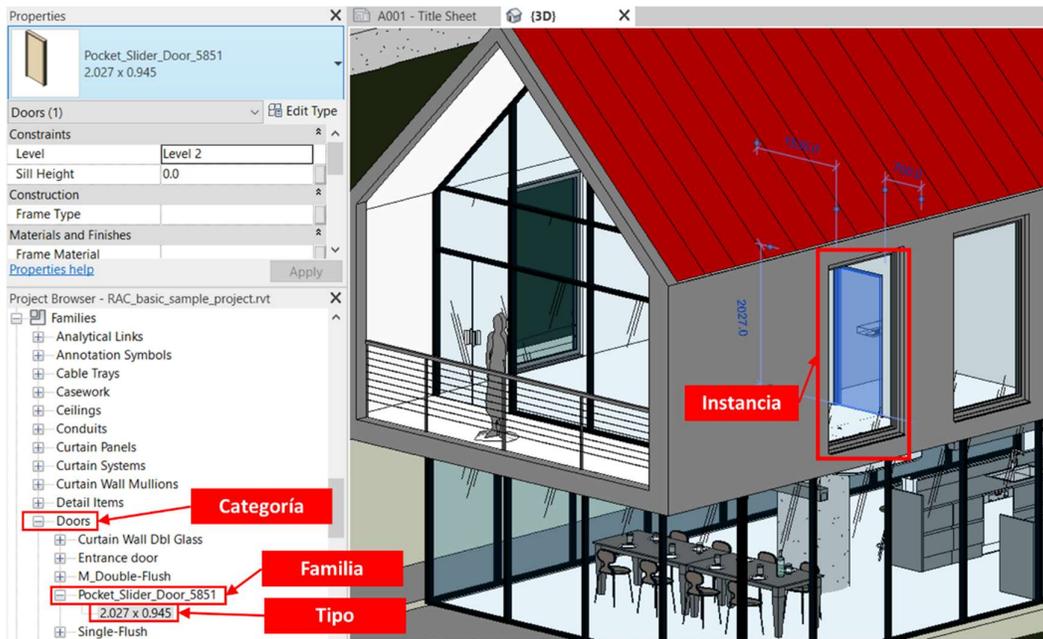


Figura 5.4. Clases y subclases BIM.

Fuente: Elaboración propia.

En Revit existen cuatro tipos de parámetros. El primer tipo se le conoce como “Parámetro Compartido”, y son los parámetros que son almacenados en un archivo de texto y que se comparten como su nombre indica a diferentes familias y proyectos. El segundo tipo de parámetro se le conoce como “Parámetro de Proyecto”, y en el caso de este parámetro solo existe en el proyecto. En este caso si se edita una familia, no tendrá por defecto el parámetro asignado en el proyecto. A diferencia del caso del “Parámetro de Familia” en el cual el parámetro existe solo en la familia. Usualmente los parámetros de familia son utilizados para restringir propiedades de las dimensiones de los componentes de la familia, controlar visibilidad de los componentes, y definir las propiedades de materiales. El último caso es “Parámetros Globales”, en el cual no esta restringido a un proyecto, categoría, o familia.

En la tesis solo se trabajará con parámetros compartidos y parámetros de proyecto. Estos parámetros almacenarán la información requerida para desarrollar el modelo de gestión. La tabla 5.5 detalla los grupos de parámetros a considerar para diseñar el archivo de parámetros compartidos, así como una breve descripción de las características de los parámetros considerados en cada grupo.

Tabla 5.5. Grupos de parámetros

Fuente: Elaboración propia.

Grupo de Parámetro	Información almacenada
Modelo	Tipo de elemento, fase de vaciado, geometría, refuerzo de acero, piso o nivel, y sector de vaciado.
Encofrado	Área de encofrado y a los pesos de estos sistemas de encofrado.
Tiempo	Fecha de desencofrado de cada elemento, tiempos de permanencia antes del desencofrado y tiempos de apuntalamiento.
Productividad	Índices de productividad para el concreto, encofrado, y acero de refuerzo. También el total de horas hombres requeridas para ejecutar las tres actividades.
Costo	Ratios de costo de cada sistema de encofrado, y el costo total de cada elemento estructural relacionado a los sistemas de encofrado, apuntalamiento, así como consumibles.

Cuando se crea un parámetro en Revit se deben seguir cuatro pasos. El primer paso es asignar el nombre del parámetro, el cual no debe tener espacios entre caracteres. El siguiente paso es asignar el tipo de información que el parámetro almacena. En el caso de Revit los tipos de información aceptados son por ejemplo texto, enteros, numérico, longitud, área, volumen, etc. El tercer paso en la creación de un parámetro es definir como se asignarán los parámetros a los componentes del modelo BIM. Los parámetros en Revit se asignan de forma individual a cada “instancia” o elemento insertado en el modelo, o por tipos de familias. El cuarto paso en la asignación de los parámetros es definir en que categorías el parámetro en creación estará habilitado como un casillero para almacenar la información.

En la figura 5.5 se detalla los pasos que se siguen para la creación de un parámetro de proyecto. Cada paso esta con una anotación en rojo detallando el orden a seguir. En el caso de la imagen se está representando la creación de un parámetro de proyecto, pero pasos similares se siguen para la creación de un parámetro compartido, cambiando la opción de selección en el primer casillero de “Tipo de parámetro”. Otra opción disponible pero no incluida en los pasos es la asignación de un grupo de parámetro. Esta opción es muy importante ya que permite organizar los parámetros según un tipo específico. En el caso de esta investigación estos grupos ya fueron explicados en la Tabla 5.5. Finalmente, en el botón “Editar Tooltip” se ingresa un comentario que sirva para clarificar el uso del parámetro creado. Esto es especialmente para parámetros compartidos en los cuales no siempre el usuario de los parámetros será el mismo creador de los parámetros.

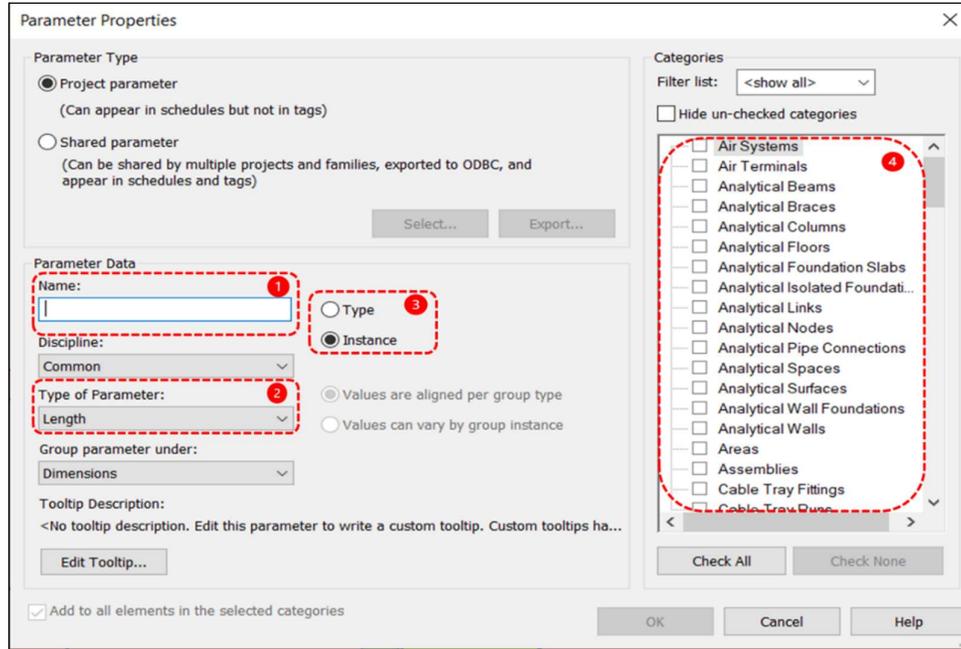


Figura 5.5. Creación de parámetro de Proyecto

Fuente: Elaboración propia

Grupo de parámetros Modelo (MOD)

Los parámetros Modelo (MOD) almacenan información referente al tipo de elemento, la altura del elemento, el nivel o piso en el que se encuentra el elemento, el sector de vaciado al que pertenece el elemento, la fase de vaciado del elemento, la cuantía de acero, el metrado de acero, y el peralte en el caso de los elementos que son vigas. La tabla 5.6 detalla los parámetros del grupo Modelo (MOD).

Tabla 5.6. Parámetros del grupo Modelo (MOD)

Fuente: Elaboración propia

Nombre del Parámetro	Descripción	Tipo	Lista Categorías
MOD Elemento	Tipo de elemento (Columna, viga, placa, etc.)	Texto	Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros, Armazón estructural, Suelos, Escaleras
MOD Altura	Tipo altura (Simple, Doble, Triple)		
MOD Nivel	Nivel del elemento (N1, N2, N3, etc.)		
MOD Frente	Frente de trabajo (F1, F2, F3, etc.)		
MOD Sector	Sector de vaciado (S1, S2, S3, etc.)		
MOD Fase	Fase (Vertical, Horizontal, Cimentación)		
MOD Codigo	Código Secuencia (F1-N1-S1-V)		
MOD Ratio Acero	Ratio de acero en kg/m ³	Número	
MOD Acero	Acero de refuerzo del elemento en kg		
MOD Peralte Viga	Tipo de peralte de viga (T1,T2,T3, T4)	Texto	Armazón estructural

MOD_Elemento: En este campo se clasifican los diferentes elementos del modelo estructural de acuerdo con una nomenclatura orientada a la gestión de los encofrados. Los elementos en este campo se clasifican en Cimentación, Columna, Placa, Viga, Escalera, y Nudo. El nudo es la intersección del elemento vertical, ya sea una columna o placa con los elementos horizontales, ya sea una losa o viga.

MOD_Altura: La altura de un encofrado en este parámetro está representado como una clasificación discreta de las alturas de los elementos. Se ha definido tres tipos de alturas: Simple, Doble y Triple. Se han definido estos rangos de altura basado en que los proveedores de encofrados suelen categorizar sus propuestas o cotizaciones según estos tres tipos de alturas. La altura de los encofrados define el costo del sistema, en el caso de los elementos verticales resistirán mayor empuje por presión del concreto fresco cuando la altura aumenta y los elementos horizontales requerirán un mayor arriostamiento para evitar pandeos de los puntales conforme aumenta la altura del entrepiso. El rango de altura simple usualmente es considerado para los elementos con una altura menor a 3.50m, los de altura doble varían entre 3.50m y 6.50m, y para el caso de los elementos de altura triple se consideran todos los encofrados con alturas mayores a 6.50m. Sin embargo, esto variara dependiendo de cada proveedor, pero siempre el costo aumenta de acuerdo con el aumento de la altura del elemento o entrepiso. El parámetro almacena un valor tipo texto que representa el tipo de altura, para altura Simple el valor será “S”, para el Doble “D” y para el triple “T”.

MOD_Nivel: El parámetro almacena un valor tipo texto que representa a cada nivel del proyecto. Para el Nivel 1, el valor será P1, para el nivel 2 será P2 y así sucesivamente.

MOD_Frente: Este parámetro almacena el frente de trabajo en el caso que el proyecto sea ejecutado en múltiples frentes de trabajo. Los valores de este parámetro son del tipo texto y se representa con la letra F seguida del número del frente, por ejemplo, para el Frente 1 el valor del parámetro será F1.

MOD_Sector: Hace referencia al sector de trabajo y el valor es almacenado como un valor texto. Por ejemplo, para el Sector 1 el valor del parámetro sería S1.

MOD_Fase: Este parámetro almacena la información de la clasificación de la etapa de vaciado del elemento. En este caso se considera que cada sector tiene hasta tres fases, las cuales son cimentaciones, verticales, u horizontales. Solo los sectores del nivel más bajo tendrán las tres fases y los niveles que no tengan techo de concreto armado solo tendrán la fase de verticales. Para una cimentación se almacenará el valor en texto “C”. Los elementos verticales son las columnas, placas y muros, y para este caso se almacenará el valor en texto “V”. Para el caso de los elementos horizontales como son las losas, vigas y los nudos (intersección de verticales y horizontales) se almacenará el valor texto “H”.

MOD_Codigo: Este parámetro almacena la combinación de todos los parámetros de ubicación y determina el orden exacto de la secuencia constructiva del elemento dentro de un tren de actividades. El valor de este parámetro es del tipo texto y es el resultado de la concatenación de los valores anteriores “Frente-Sector-Nivel-Fase”. Por ejemplo, en el caso de los verticales Frente 1, Sector 1, Primer Piso, el código de secuencia que se almacena en este parámetro es “F1-S1-P1-V”.

MOD_Ratio_Acero: Este parámetro almacena el valor de la cuantía de acero de cada tipo de elemento en kg/m^3 .

MOD_Acero: Este parámetro almacena el valor estimado de acero en cada elemento de concreto armado en kg. La estación se realiza en función al volumen de concreto y a la cuantía de acero del tipo de elemento.

MOD_Peralte_Viga: Este parámetro almacena el tipo de peralte de viga. El peralte de viga afecta el costo debido a que a mayor peralte el sistema resistirá mayor presión. Por ejemplo, una viga con peralte mayor a 70cm generalmente requiere de pasadores o pasante mientras que peraltes menores funcionan únicamente con escuadras (ver figura 5.6). Para la tesis se han considerado 4 tipos de peraltes basándose en las alternativas de costo que usualmente los proveedores de encofrado cotizan. Peraltes tipo 1, tienen un peralte menor a 0.40m. Peraltes tipo 2 tienen un peralte entre 0.40m y 0.70m. Peraltes tipo 3 tienen un peralte entre 0.70m y 1.00m. Finalmente Peraltes tipo 4 tienen un peralte mayor a 1.00m.



Figura 5.6. Encofrado de viga con escuadras, y con pasadores

Fuente: Doka.com, 2020 y Unispan.com.pe, 2020

Grupo de parámetros Productividad (PROD)

Este grupo de parámetros está orientado a almacenar información de los índices de productividad para las partidas de acero, encofrado, y concreto. Así mismo para almacenar la cantidad de horas hombres como resultado de multiplicar cada índice de productividad con su respectivo metrado. La tabla 5.7 detalla los parámetros de este grupo.

Tabla 5.7. Parámetros de grupo productividad (PROD)

Fuente: Elaboración propia.

Nombre parámetro	Descripción	Tipo	Lista Categorías
PROD_IP_Conc	Índice de productividad en horas hombre por m ³ de concreto.	Numero	Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros, Armazón estructural, Suelos, Escaleras
PROD_IP_Enc	Índice de productividad en horas hombre por m ² de encofrado.		
PROD_PI_Ace	Índice de productividad en horas hombre por kg de acero.		
PROD_HH	Horas hombres totales para colocar acero, encofrar y vaciar un elemento de concreto.		

Grupo de parámetros Tiempo (TIEMPO)

Este grupo de parámetros almacena la información relacionada a las fechas de desencofrado, tiempos de desencofrado y reapuntalamiento. La tabla 5.8 detalla los parámetros de este grupo.

Tabla 5.8. Parámetros del grupo tiempo (TIEMPO)

Fuente: Elaboración propia.

Nombre parámetro	Descripción	Tipo	Lista categorías
TIEMPO_Fecha	Fecha de desencofrado del elemento de concreto armado.	Número	Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros, Armazón estructural, Suelos, Escaleras
TIEMPO_Encofrado	Número de días que elemento debe permanecer encofrado.		
TIEMPO_Apuntalamiento	Número de días que elemento horizontal (losa o vigas) debe reapuntalarse.		Armazón estructural, Suelos, Escaleras

Grupo de parámetros encofrado (ENCOF)

Este grupo de parámetros almacena la información relacionada a las áreas de contacto de los encofrados disgregando las caras laterales de los fondos. En este grupo también están los parámetros relacionados al ratio de peso de los encofrados (kg/m²) y los parámetros que almacenan el peso total de los sistemas utilizados para cada elemento de concreto en kg. La tabla 5.9 detalla los parámetros de este grupo.

Tabla 5.9. Grupo de parámetros de encofrados (ENCOF)

Fuente: Elaboración propia.

Nombre parámetro	Descripción	Tipo	Lista categorías
ENCOF_Area_Lateral	Área de contacto de las caras a encofrar de los elementos de concreto.	Área	Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros, Armazón estructural, Suelos, Escaleras
ENCOF_Area_Fondo	Área de contacto de las caras de fondo de los elementos de concreto.		
ENCOF_Area_Total	Área de contacto total a encofrar de los elementos de concreto.		
ENCOF_Peso_Lateral	Peso por metro cuadrado (kg/m^2) de los sistemas de encofrados laterales.	Número	Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muro
ENCOF_Peso_Fondo	Peso por metro cuadrado (kg/m^2) de los sistemas de encofrados para fondos.		Suelos, Escaleras
ENCOF_Peso_Soporte_ML	Peso por metro lineal (kg/ml) de los sistemas de soportería para vigas.		Armazón estructural
ENCOF_Peso_Puntal_ML	Peso por metro lineal de los puntales (kg/ml) para reapuntalar vigas.		
ENCOF_Peso_Puntal_M2	Peso por m^2 de los puntales (kg/m^2) para reapuntalar elementos horizontales.		Suelos, Escaleras
ENCOF_Peso_Total	Peso total de los sistemas de encofrados requeridos para encofrar el elemento de concreto armado.		Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros, Armazón estructural, Suelos, Escaleras
ENCOF_Peso_Puntal	Peso total de los sistemas de apuntalamiento para reapuntalar un elemento horizontal de concreto armado.		Armazón estructural, Suelos, Escaleras

Grupo de parámetros costo (COSTO)

Este grupo de parámetros almacena la información relacionada a los costos unitarios por m^2 de los sistemas de encofrados, sistemas de apuntalamiento y costos de consumibles. Así mismo se almacenan los costos computados como resultado de multiplicar los costos unitarios por m^2 por las áreas de contacto de los encofrados. La tabla 5.10 detalla los parámetros de este grupo.

Tabla 5.10. Grupo de parámetros de costos (COSTO)

Fuente: Elaboración propia

Nombre parámetro	Descripción	Tipo	Lista categorías
COSTO_PU_Lateral	Costo unitario de alquiler de sistema de encofrado vertical (\$/m2-día). Incluye paneles, largueros, y barrotes.	Número	Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros, Armazón estructural, Suelos, Escaleras
COSTO_PU_Fondo	Costo unitario de alquiler de sistema de encofrado horizontal (\$/m2-día). Incluye vigas principales, secundarias y soportería. No incluye paneles.		Suelos, Escaleras
COST_PU_Fondo_Puntal	Costo unitario de alquiler de sistema de apuntalamiento (\$/m2-día).		Armazón estructural
COSTO_PU_ML	Costo unitario de alquiler de soportería de viga. (\$/ml-día).		
COSTO_PU_ML_Puntal	Costo unitario de alquiler de reapuntalamiento de viga. (\$/ml-día).		
COSTO_PU_Consumible	Costo unitario (\$/m2) para consumibles. Incluye materiales como fundas, conos, tubos de PVC.		Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros
COSTO_Encofrado	Costo total de alquiler del sistema de encofrado. Resultado de multiplicar costo unitario por el área de contacto.		Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros, Armazón estructural, Suelos, Escaleras
COSTO_Puntal	Costo total de alquiler del sistema de apuntalamiento. Resultado de multiplicar costo unitario por el área de contacto.		Armazón estructural, Suelos, Escaleras
COSTO_Consumible	Costo total de consumibles. Resultado de multiplicar costo unitario por el área de contacto.		Cimentación estructural, Pilares estructurales, Muros

Automatización de la gestión de parámetros

La creación de los parámetros en un nuevo modelo se evita si se cuenta con el archivo de parámetros compartidos. El archivo de parámetros compartidos es un archivo tipo texto y contiene todos los 36 parámetros descritos en las secciones anteriores. Como son 36 parámetros el proceso es largo, tedioso y generar errores de digitación. Por ello es importante obtener el archivo de parámetros compartidos o utilizar una herramienta de automatización que genere los parámetros en el proyecto o inclusive una herramienta de automatización que pueda crear el archivo de texto con todos los parámetros compartidos.

En la figura 5.7 se detalla el flujo de trabajo creado en Dynamo Revit, para automatizar la creación de parámetros compartidos. Este “script” o programa es una red de nodos y vínculos que transfieren los resultados de cada nodo a nuevos nodos para procesarlos y generar nuevos resultados en un flujo aguas abajo. En este “script” el programa importa un archivo de Excel con la información de los parámetros, luego el programa almacena la información de las celdas necesarias del archivo. De las celdas seleccionadas se obtiene los parámetros, sus grupos, y sus categorías. Con esta información se crean los parámetros compartidos.

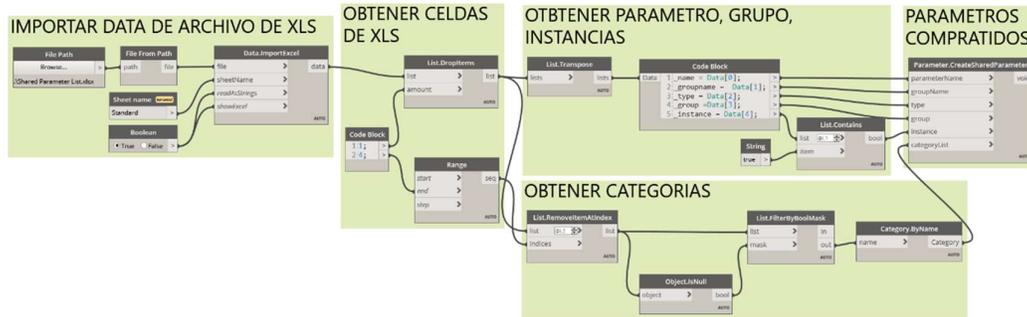


Figura 5.7. Dynamo Script para crear parámetros compartidos.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.8 se detalla el proceso usando Dynamo Player para la generación de los parámetros compartidos en el archivo tipo texto nombrado “Parámetros compartidos”. En lado izquierdo de la imagen se detalla como el archivo de extensión “.txt” esta vacío pero luego de correr el script se han generado los parámetros compartidos en el lado derecho de la imagen.

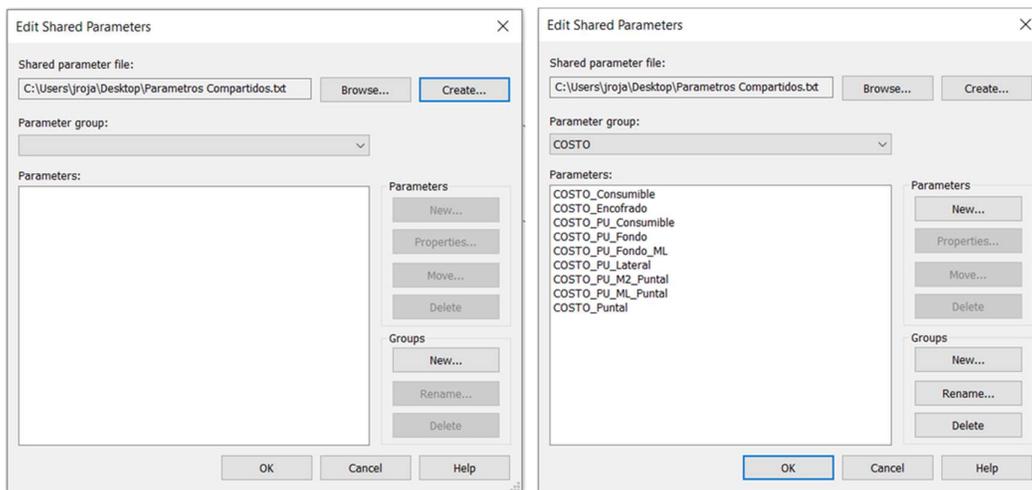


Figura 5.8. Creación automatizada de parámetros compartidos

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera se generan los parámetros en cada uno de los elementos del modelo sin necesidad de depender de un archivo para compartirlos. Con la automatización BIM, se diseñó un script que automatiza el proceso de creación de parámetros de proyecto y los genera de forma automática, sin posibilidad a errores y de forma instantánea. La figura 5.9 detalla como los parámetros fueron insertados en cada uno de los elementos del modelo BIM ya sea utilizando el Dyanmo Script para crear parámetros compartidos o parámetros de proyecto.

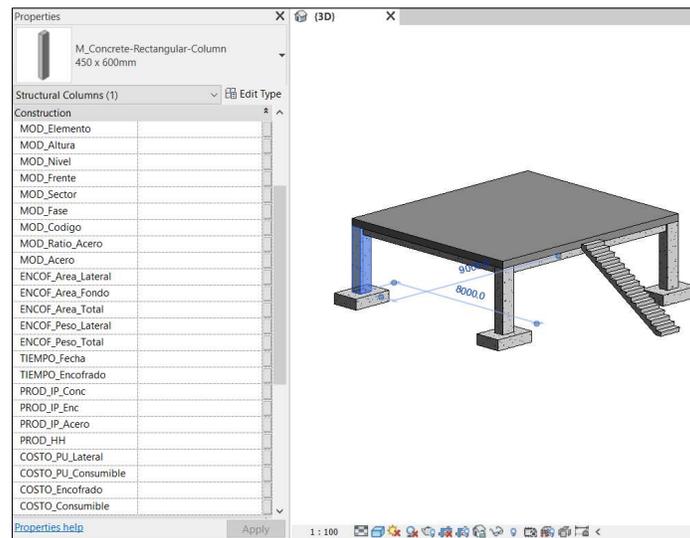


Figura 5.9. Resultado de ejecutar Dynamo script

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Auditoría modelo BIM automatizada

La auditoría del modelo consiste en adecuar el modelo BIM con los criterios de modelamiento necesarios para ejecutar la secuencia de programas de automatización de tal forma que no se generen errores en el flujo. Debido a que no todo usuario de Revit tiene los mismos criterios de modelamiento, se identificó dos criterios fundamentales que son recurrentes y que son necesarios de evaluar. El primer criterio es que la prioridad estructural en las uniones de elementos son los verticales, luego las vigas y por ultimo las losas. El segundo criterio de modelamiento a auditar y corregir es que los nudos deben ser separados de los elementos verticales ya que no son vaciados durante el proceso de vaciado de verticales sino durante el vaciado de los horizontales.

Para el primer criterio de modelamiento se ha diseñado un script que consiste en cambiar la prioridad de las categorías de los elementos estructurales. En este caso el script se ejecuta una primera vez indicando como la categoría principal a las vigas, y la segunda categoría a las losas. Luego se vuelve a ejecutar el script, pero ahora indicando como la categoría principal a las columnas, y la segunda categoría a las vigas. En la figura 5.10 se detalla el Dynamo script diseñado para automatizar este primer criterio de auditoría de modelamiento BIM.

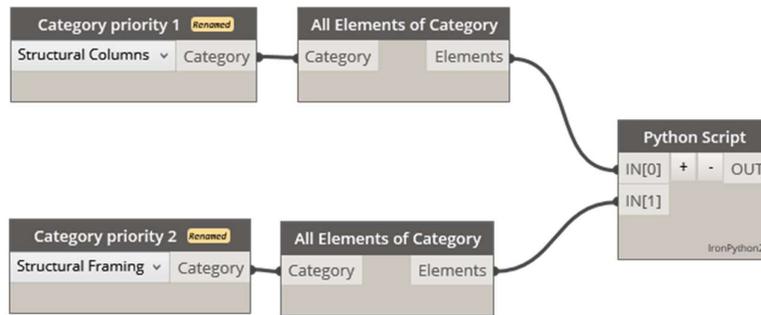


Figura 5.10. Dynamo Script para corregir prioridad de elementos.

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo en la figura 5.11 se detalla en resultado de ejecutar este script en Revit. En el lado izquierdo de la figura se detalla el modelo de prueba antes de cambiar las prioridades de los elementos y en lado derecho el resultado luego de ejecutar el script.

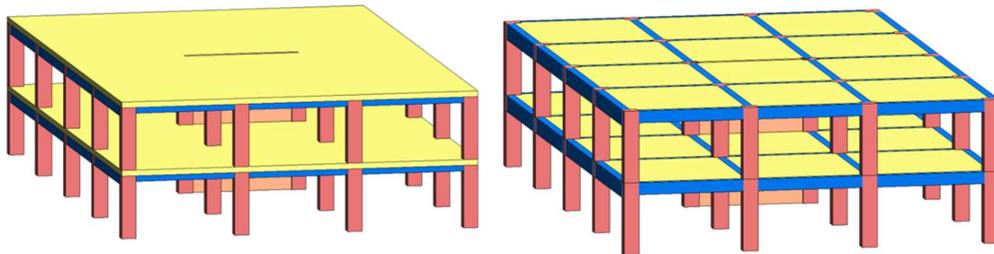


Figura 5.11. Resultado de ejecutar script de prioridades.

Fuente: Elaboración propia.

El segundo criterio de auditoría y corrección de los modelos BIM antes de comenzar a ejecutar el flujo de automatizado de proceso BIM, es separar los nudos de los elementos verticales. Por “constructividad” las columnas son vaciadas hasta el fondo de vigas y las placas son vaciadas hasta el fondo de losas. Para respetar este criterio de constructibilidad se debe corregir el modelo y separar los nudos de los verticales para contabilizar el encofrado de esos nudos como parte del encofrado de los horizontales.

La figura 5.12 detalla el flujo de trabajo automatizado para obtener los nudos de las columnas de un modelo de muestra. El script selecciona todas las columnas del modelo e identifica la altura del fondo de viga más peraltado de cada columna. Luego genera un nudo con una altura que coincide con la viga más peraltada. Finalmente crea una columna recortada hasta el fondo de viga y elimina la columna original. Hacer este proceso de forma manual es muy engorroso y genera alta probabilidad de error, pero al automatizar el proceso se elimina la necesidad de invertir horas hombre en modelado, así como elimina la posibilidad de error al definir la altura a cortar las columnas.

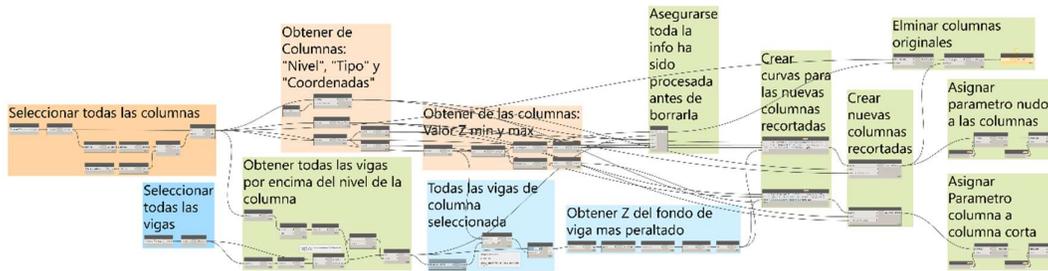


Figura 5.12. Dynamo script para crear nudos.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5.13 detalla los resultados de ejecutar el script anterior. En la parte izquierda de la imagen se detalla en rojo las columnas y en azul a las vigas. Intencionalmente se han ocultado las losas y cimentaciones para facilitar la visualización de los resultados. En la mano derecha se muestra que los nudos han sido generados en color verde.

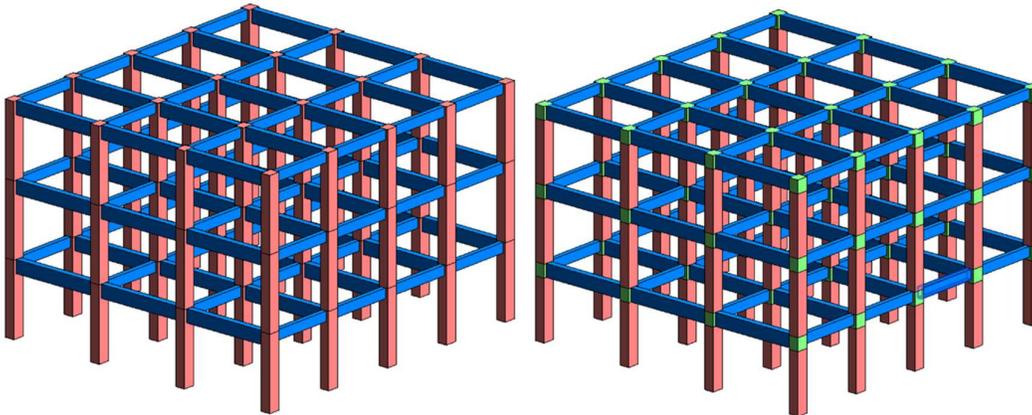


Figura 5.13. Resultado de script para separar nudos.

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar se generan los nudos entre las placas y las losas. En la figura 5.14 se detallan los resultados obtenidos de ejecutar un script similar para editar un modelo que no fue creado con la consideración de modelar las placas hasta los fondos de losas y separar los nudos. En la figura 5.14 se detallan los resultados de ejecutar el script para cortar las placas hasta el fondo de losa y separar los nudos. En el lado izquierdo de la figura se detalla un ejemplo del modelo en el cual no se consideró el criterio de modelar las placas hasta fondos de losas. En el lado derecho se detalla como en naranja están las placas, en verde las losas y en amarillo los nudos de placas y losas.

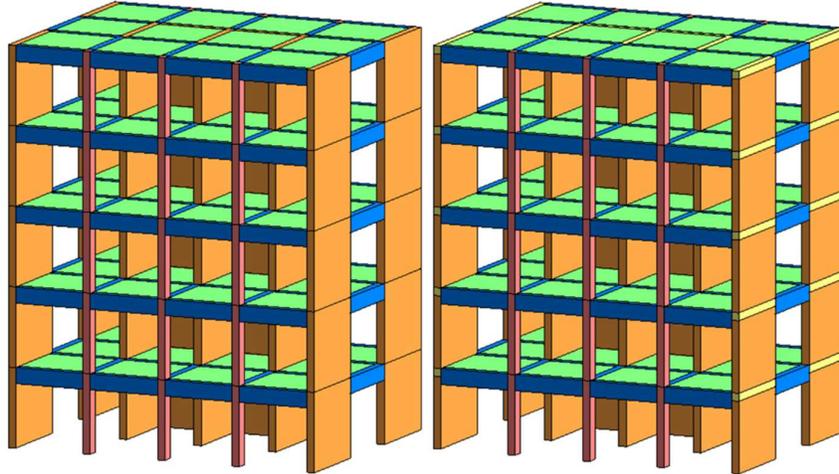


Figura 5.14. Resultados Dynamo script para nudos de placas.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Sectorización automatizada

El criterio utilizado para automatizar la sectorización está basado en un algoritmo matemático propuesto en esta tesis. El algoritmo es un problema de programación lineal cuyo objetivo es minimizar la variación de horas hombre entre diferentes sectores del proyecto. La fórmula que representa este algoritmo de optimización esta detallada en la ecuación 5.1.

$$\min_{ij}(\delta_C + \delta_E + \delta_A) \quad (5.1)$$

Donde:

“ δ_C ” es la sumatoria de la variación de horas hombre entre sectores consecutivos necesarias para el vaciado de concreto armado.

“ δ_E ” es la sumatoria de la variación de horas hombre entre sectores consecutivos necesarias para el encofrado de concreto armado. La variación se considera solo entre sectores consecutivos.

“ δ_A ” es la sumatoria de la variación de horas hombre entre sectores consecutivos necesarias para colocar el acero de refuerzo del concreto armado. La variación se considera solo entre sectores consecutivos.

$$\delta_C = \sum_{j=2}^m \left(\sum_{i=1}^n (C_{i,j} \cdot IP_C) - \sum_{i=1}^n (C_{i,j-1} \cdot IP_C) \right) \quad (5.2)$$

$$\delta_E = \sum_{j=2}^m \left(\sum_{i=1}^n (E_{i,j} \cdot IP_E) - \sum_{i=1}^n (E_{i,j-1} \cdot IP_E) \right) \quad (5.3)$$

$$\delta_A = \sum_{j=2}^m \left(\sum_{i=1}^n (A_{i,j} \cdot IP_A) - \sum_{i=1}^n (A_{i,j-1} \cdot IP_A) \right) \quad (5.4)$$

Sujeto a:

$$H_1: A_{i,j} = C_{i,j} \cdot \rho$$

$$H_2: \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n C_{i,j}) = \text{Volumen total de concreto en edificación}$$

$$H_3: \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n E_{i,j}) = \text{Área total de encofrado en edificación}$$

Donde:

$$C_{i,j} = \text{Volumen de concreto del elemento "i" del sector "j"} (m^3)$$

$$E_{i,j} = \text{Área de encofrado del elemento "i" del sector "j"} (m^2)$$

$$A_{i,j} = \text{Peso de acero del elemento "i" del sector "j"} (kg)$$

$$IP_C = \text{Indice de productividad del concreto (hh/m}^3\text{)}$$

$$IP_E = \text{Indice de productividad del encofrado (hh/m}^2\text{)}$$

$$IP_A = \text{Indice de productividad del acero (hh/kg)}$$

$$\rho_i = \text{Cuantía de acero para elemento "i"} (kg/m^3)$$

Teniendo como base el algoritmo anterior se desarrolló para la tesis un script para sectorizar la edificación basándose en elegir los sectores que satisfacen la menor variabilidad de horas hombres requeridas. En la figura 5.15 se detalla el flujo de trabajo para asignar un valor o numero de sector a cada uno de los elementos de concreto armado. Para ello el programa crea solidos con los bordes de lo que sería cada sector en el espacio. Cada sector estará representado por una caja en 3D que delimita el sector y todos los elementos dentro de esa caja serán asignados con un sector específico.

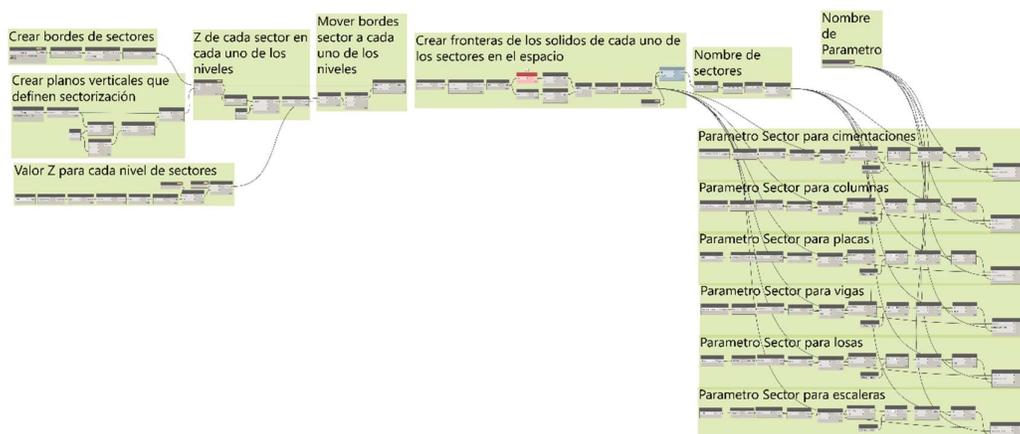


Figura 5.15. Dynamo script para sectorizar edificaciones.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.16. se detalla el resultado de ejecutar el programa en un proyecto de edificaciones y especificando que la restricción sea de 4 sectores. En la imagen los sectores mostrados de amarillo, naranja, verde y celeste se han nivelado de tal forma que la variación de horas hombre entre sectores sea la menor posible. En este ejemplo el edificio es homogéneo teniendo plantas típicas lo que facilita la definición de las líneas limítrofes de cada sector.

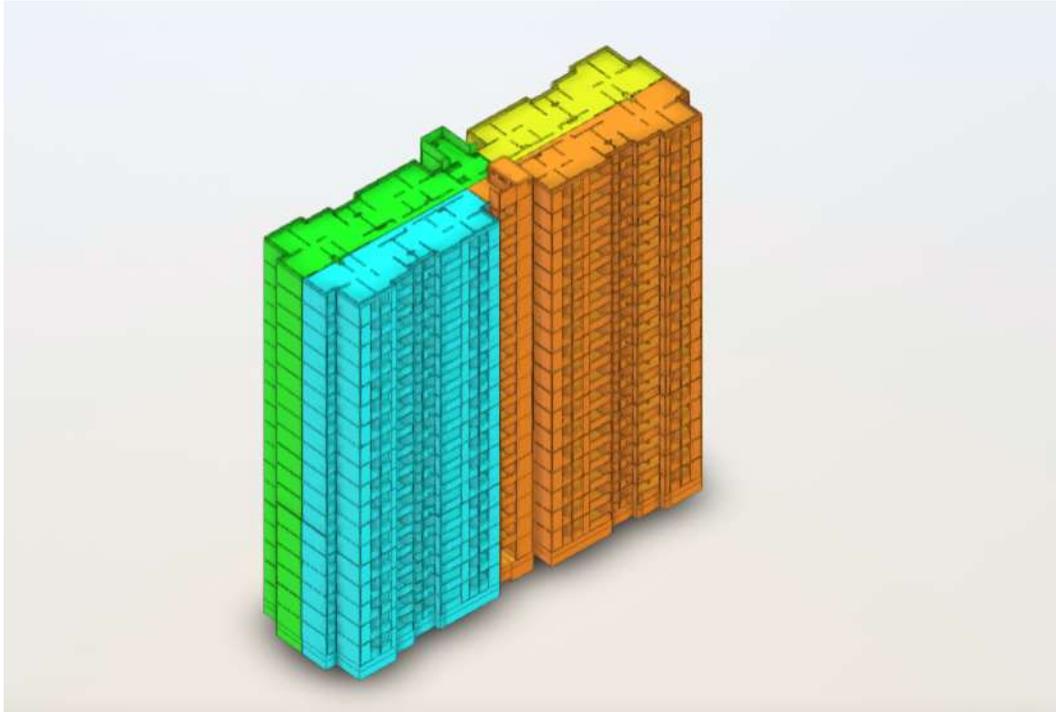


Figura 5.16. Vista 3D de modelo sectorizado con algoritmo.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.4. Cálculo de parámetros automatizada

Los parámetros que se han creado de forma automatizada en la sección 5.3.1 se calcularon de forma automatizada utilizando también programación grafica con Dynamo. Para ello se diseñó scripts para el cálculo de los parámetros MOD, ENCOF, TIEMPO, PROD, COSTO. En esta sección se desarrolla brevemente el diseño de cada una de las herramientas, así como la lógica de su funcionamiento.

Automatización del cálculo de parámetros MOD

Para automatizar el proceso de llenado de los parámetros del grupo “MOD” se diseñó un conjunto de scripts en Dynamo para Revit. En la figura 5.17 se detalla de forma general las redes de los nodos diseñados para calcular cada uno de los parámetros. Por ejemplo, resaltado en el primer bloque de fondo verde se detalla los nodos que seleccionan cada tipo de elemento y le asignan el valor de parámetro correspondiente a “tipo de elemento”.

De manera similar en el segundo bloque de redes titulado “Altura” se agrupan los flujos de trabajo relacionados a los nodos correspondientes las alturas de cada elemento. En el caso de columnas y placas la altura de cada elemento determina si es de altura simple, doble o triple. Para los elementos horizontales está en función a la altura de entrepiso. En el bloque “Nivel” se le asigna a cada uno de los elementos el nivel en el que se encuentra el elemento. En el bloque titulado “Frente” se le asigna el frente correspondiente a cada uno de los elementos. Por defecto en el programa este valor siempre será Frente 1, considerando que solo existe un frente de trabajo. En el bloque “Peralte de Viga”, se le asignó el valor de T1, T2, T3 o T4 dependiendo del peralte de la viga y en función a lo detallado en la sección 5.3.1, subsección “MOD_Peralte_Viga”. El bloque “Fase V/H/C” detalla las redes de nodos que ejecutan el cálculo y llenado de la fase de cada elemento. Las columnas y placas son de la fase verticales (V), las vigas, losas, escaleras y nudos son de la fase horizontales (H) y las zapatas y cimientos corridos son de la fase cimentaciones (C).

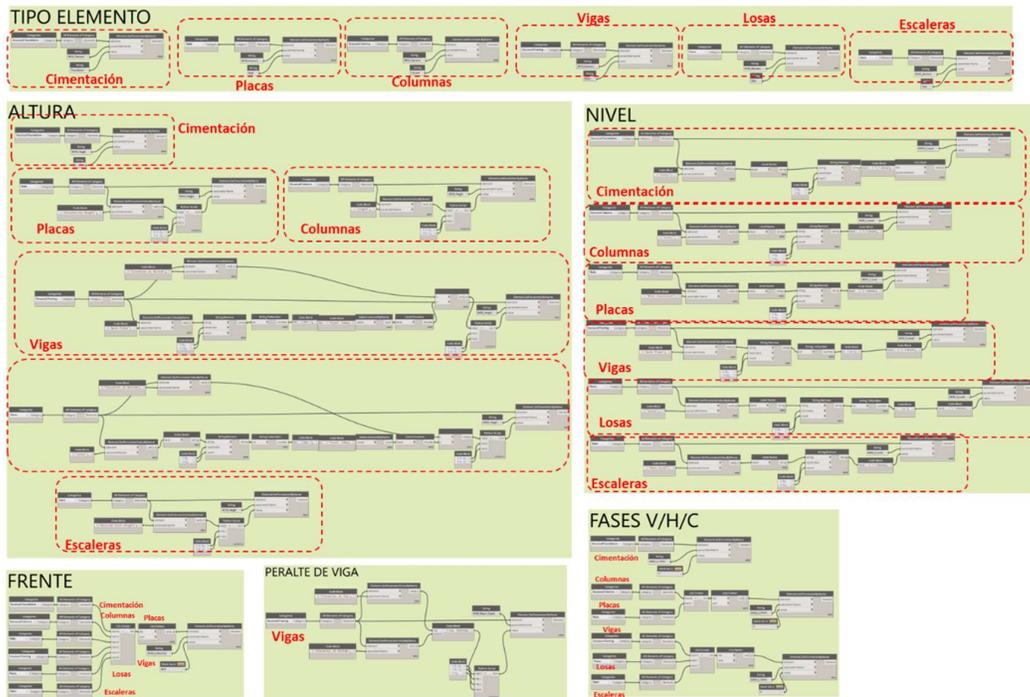


Figura 5.17. Dynamo Scripts para parámetros MOD

Fuente: Elaboración propia.

Se diseñó un script en Dynamo para el llenado automatizado del parámetro “Código” que concatena en un valor alfanumérico la denominación única de la secuencia constructiva de cada elemento en el modelo BIM. Este valor único tiene el formato “F#-P#-S#-#” que resume Frente-Piso-Sector-Fase. Para la columna, del primer sector por ejemplo el código es “F1-P1-S1-V”. La figura 5.18 detalla la red de nodos para automatizar este proceso.

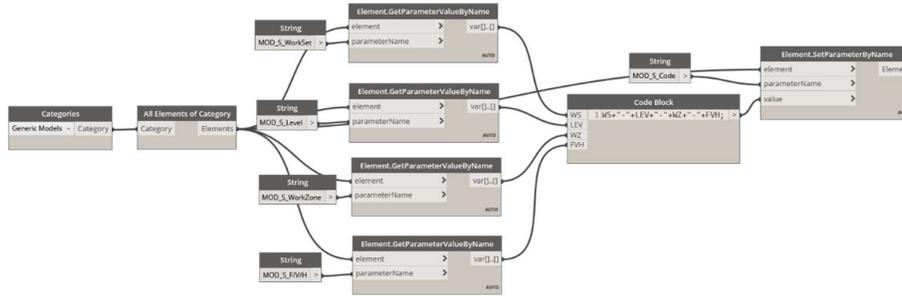


Figura 5.18. Dynamo script para generar código secuencia.

Fuente: Elaboración propia.

También se diseñó un script para el llenado de las cuantías de acero para cada elemento, así como el cálculo del metrado de acero en base a estas cuantías. La figura 5.19 detalla las redes diseñadas en Dynamo para el llenado automatizado de las cuantías y metrados de acero de cada uno de los elementos del modelo BIM. En la tabla 5.11 se presentan valores referenciales obtenidos de registros de obra para ser utilizados en el algoritmo, pero son editables según se requiera para diferentes tipos de estructuras.

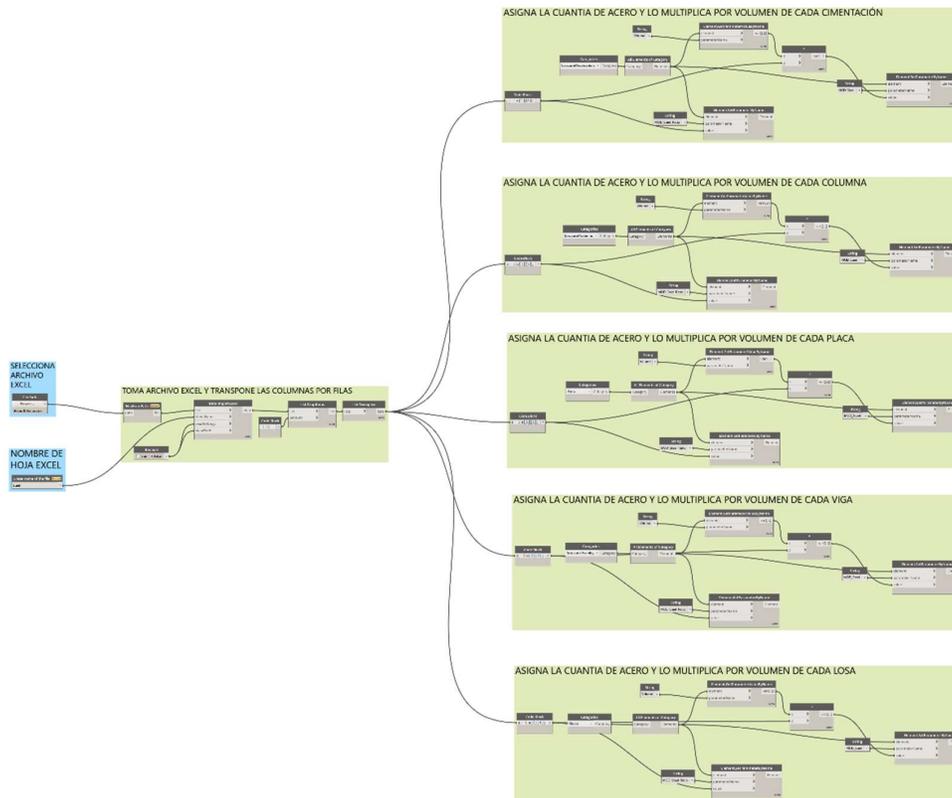


Figura 5.19. Dynamo script para calcular cuantías y estimación metrado de acero por cuantías.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.11. Valores de cuantías de acero por elemento del Proyecto Neo 10.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Cimentación	Columna	Placa	Viga	Losa
Cuantía (kg/m ³)	60	210	190	160	120

Automatización del cálculo de parámetros ENCOF

Para modelar el encofrado se utilizó modelo LOD 200. En un LOD 200 el encofrado está representado de forma genérica utilizando una capa que representa las caras de los encofrados. Con este modelo que utiliza elementos de la categoría “Modelo Genérico” de Revit ya representan una idea clara de las dimensiones de las formas, así como de la ubicación de estas respecto a los elementos de concreto armado. Debido a que todo el análisis para el planteamiento del encofrado y la evaluación de los proveedores está basado en el metro cuadrado y el costo por metro cuadrado, un modelo LOD 200 es suficiente para alcanzar estos objetivos.

Para generar el modelo del encofrado de forma automatizada se diseñó el Dynamo Script detallado en la figura 5.20. En este flujo de programación grafica el primer grupo de nodos agrupados por el contorno de línea discontinua en rojo cumple la función de seleccionar los elementos por categorías. Luego cada grupo de elementos seleccionados son llevados a un flujo de nodos que obtendrán las caras de contacto de cada elemento de concreto y disgregarán las caras que deben ser encofradas. Luego se computan las áreas de contacto de las caras identificadas a encofrar y la información es almacenada en el parámetro correspondiente de cada elemento de concreto armado modelado.

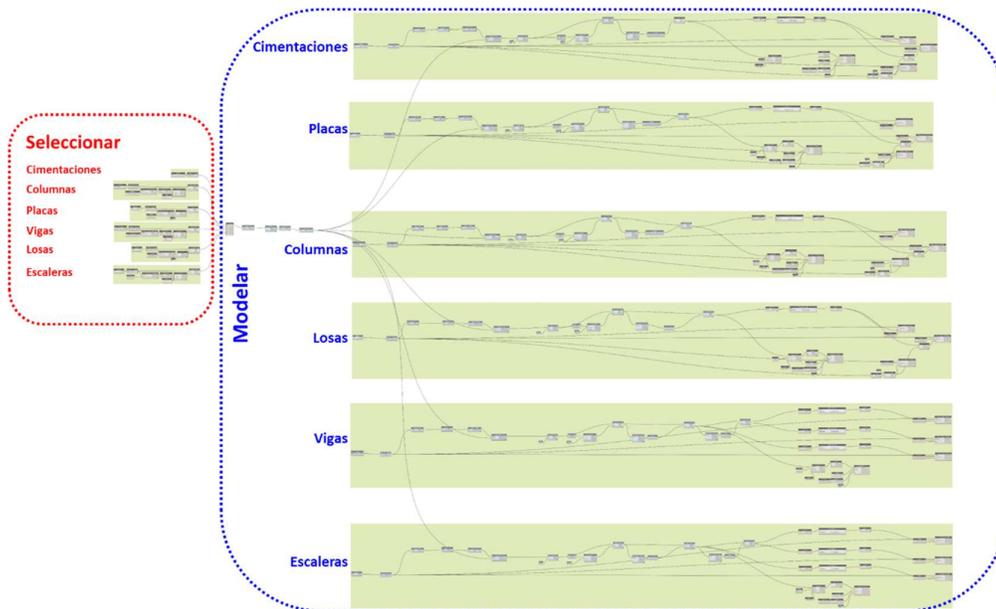


Figura 5.20. Dynamo Script para modelado automático de encofrado.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.21 se detalla los resultados de ejecutar el Dynamo script de modelado automático de encofrados LOD 200. En el lado izquierdo de la imagen se detalla cada uno de los elementos de concreto armado resaltado en diferentes colores. Luego en el lado derecho de la imagen se detalla el encofrado modelado y a la vez se han ocultado los volúmenes de los elementos de concreto armado. Cada encofrado ha sido disgregado para ser luego ser cargado los valores del área de encofrado en cada uno de los elementos de concreto armado. Así mismo se ha disgregado el área de encofrado lateral, del encofrado de fondo.

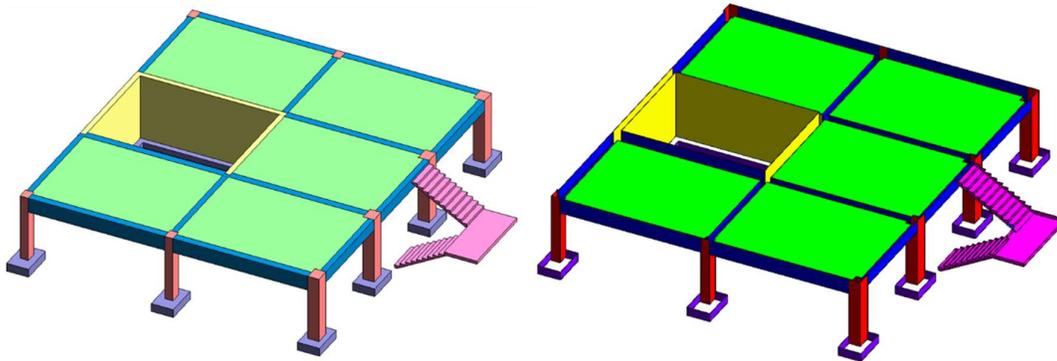


Figura 5.21. Resultado de modelado automatizado con Dynamo.

Fuente: Elaboración propia.

Es importante detallar como el encofrado para cada elemento es disgregado en encofrado lateral y encofrado de fondo porque algunos elementos como las vigas y las escaleras tienen ambos encofrados (laterales y fondos). En la figura 5.22 se detalla como el encofrado este modelado por caras independientes lo que permite detallar que caras de encofrado son laterales y cuáles de fondo. Las áreas correspondientes al encofrado lateral y al encofrado de fondo son calculadas con el modelo y estos valores insertados en los parámetros correspondientes.

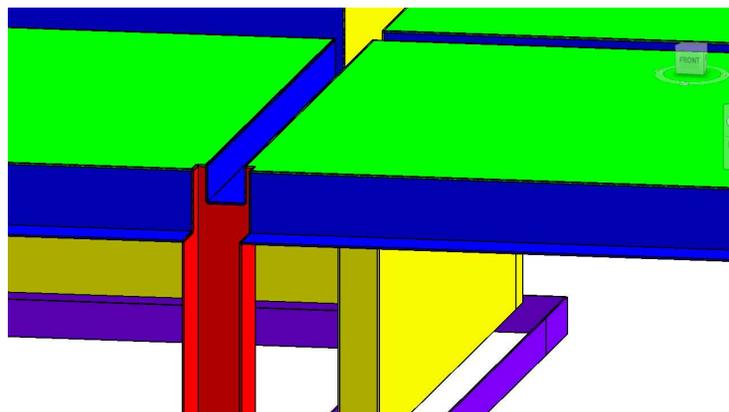


Figura 5.22. Vista 3D de encofrado modelado LOD200.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.23 se detalla una vista general del flujo de trabajo para automatizar el cálculo del peso de cada sistema de encofrado por elemento de concreto. Este valor es estimado en base a ratios de pesos de cada tipo de sistema, y luego este ratio es multiplicado por el área de encofrado de cada elemento de concreto. El peso del sistema encofrado es calculado para cada elemento y luego este valor es almacenado en el parámetro correspondiente de cada elemento modelado en BIM.

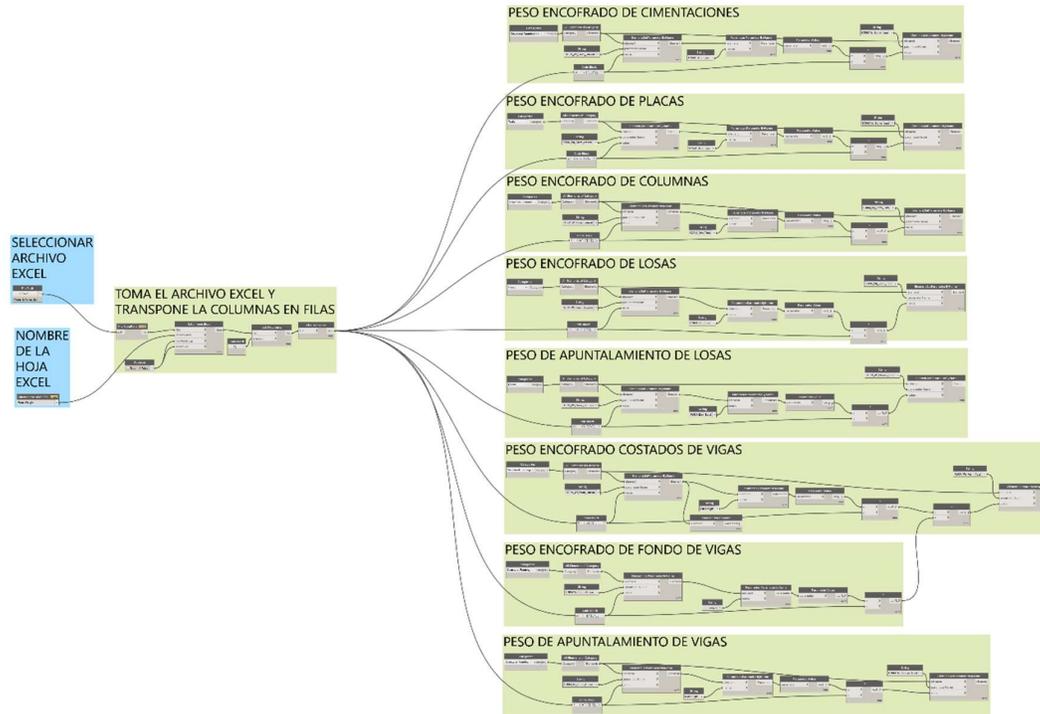


Figura 5.23. Dyanmo script para cálculo de pesos de encofrados.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5.12 se detallan algunos valores referenciales ingresados en el modelo para estimar los pesos de los sistemas de encofrados para cada tipo de elemento. Algunos valores están estimados por m², pero otros por ml como es el caso de las vigas. Esto para alinearse con la forma en la que los proveedores de encofrados cotizan sus encofrados.

Tabla 5.12. Pesos referenciales para sistemas de encofrados.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Cimentaciones	Placas	Losas			Vigas		
			Columnas	Soporte	Puntales	Costados	Soporte	Puntales
Peso	100 kg/m ²	100 kg/m ²	65 kg/m ²	45 kg/m ²	10 kg/m ²	70 kg/m ²	100 kg/m	50 kg/m

Automatización del cálculo de parámetros TIEMPO

Los parámetros TIEMPO almacenan la fecha en la cual cada elemento debe ser encofrado y en el caso de los elementos verticales, cuantos días debe permanecer encofrado el elemento. Para el caso de los horizontales, además de la fecha de desencofrado también tienen un parámetro que almacena la información correspondiente al número de días que el elemento debe permanecer encofrado y luego cuantos días más debe permanecer apuntalado luego de retirado los encofrados. En la figura 5.24 se detalla el flujo de trabajo diseñado para el llenado de los valores mencionados en este párrafo. El flujo recolecta todos los elementos por categorías y extrae de una macro en Excel enlazado con un cronograma de MS Project (ver Anexo1), todos los valores de fechas y tiempos relacionados al desencofrado. Luego todos estos valores son transferidos de forma automática al modelo BIM.

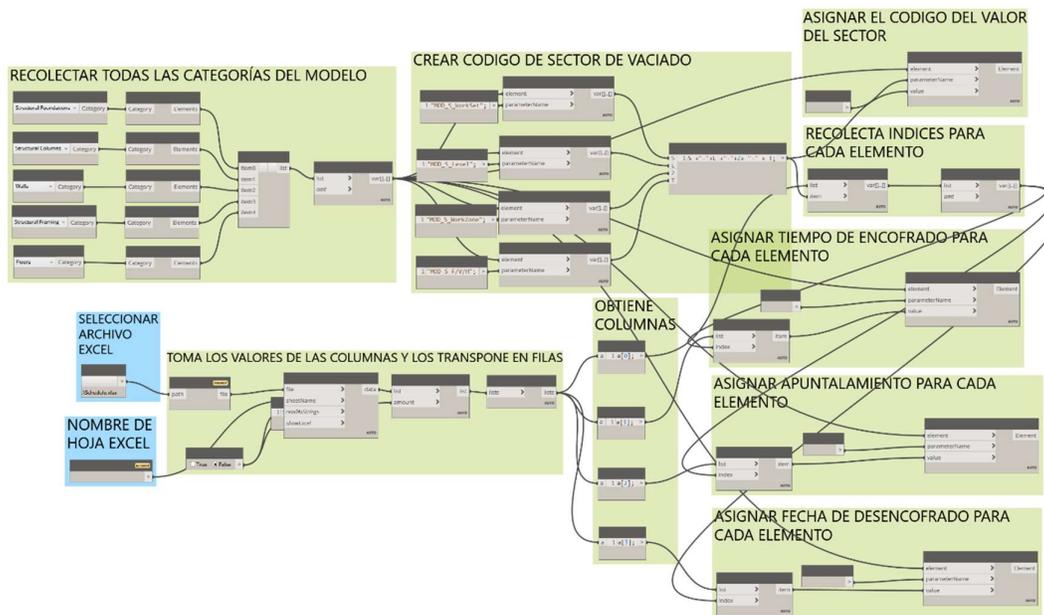


Figura 5.24. Dynamo script para calculo tiempos.

Fuente: Elaboración propia.

Automatización del cálculo de parámetros PROD

Para el cálculo de los parámetros del grupo PROD se cuenta con una base de datos de índices de productividad que han sido tomados de registros históricos de obra por el autor. Estos valores son referenciales y deben ser ajustados de acuerdo con las necesidades del proyecto que se esté analizando. Para el caso de proyecto presentado en la presente investigación los valores son registros específicos del proyecto NEO 10 y similares. La tabla 5.13 detalla los valores para los índices de productividad para la colocación del concreto, para el habilitado y colocado de acero de refuerzo y para la instalación de encofrado modular prefabricado.

Tabla 5.13. Índice de Productividad referencial para concreto armado.

Fuente: Elaboración propia.

Actividad	Concreto	Encofrado	Acero
Índice Productividad	1.50 hh/m ³	1.65 hh/m ²	0.045 hh/kg

En la figura 5.25 detalla el flujo de trabajo para automatizar el llenado de los parámetros correspondientes a los índices de productividad para cada elemento, así como el computo de la cantidad de horas hombre requeridas para ejecutar cada elemento. Al igual de los índices de productividad, el metrado de horas hombre son almacenadas en los correspondientes parámetros del tipo PROD. Las horas hombre son el resultado de la sumatoria de horas hombre de cada actividad. Las horas hombre por actividad es el resultado de multiplicar el índice de productividad por su correspondiente metrado.

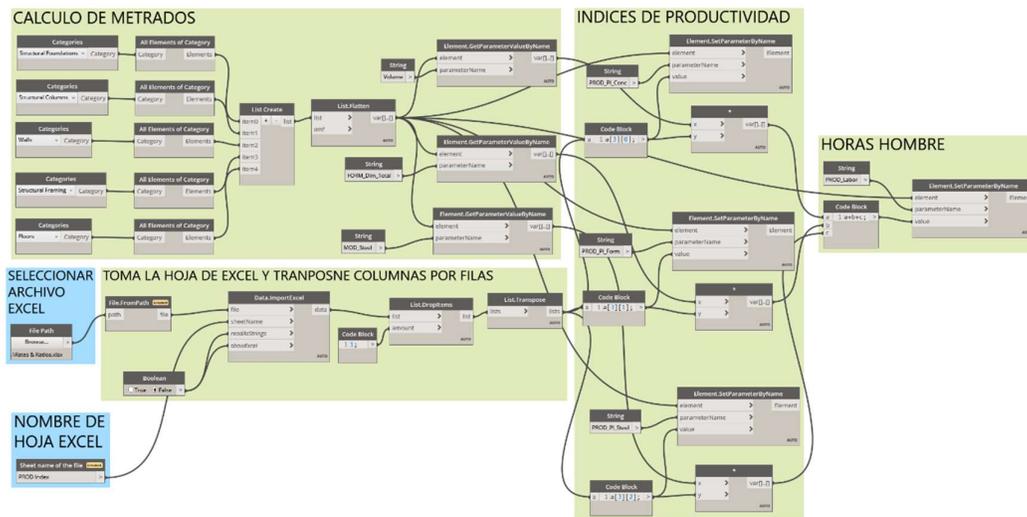


Figura 5.25. Dynamo Script para el cálculo de horas hombre.

Fuente: Elaboración propia.

Automatización del cálculo de parámetros COSTO

El grupo de parámetros COSTO contiene los parámetros asociados a los costos por consumibles y a los parámetros asociados a los costos por alquiler. Los costos por consumibles solo afectan a los elementos verticales como columnas, placas, y a las vigas con peralte mayor a 0.70m que requieren de pasadores para el encofrado lateral. Los costos de consumibles se calculan específicamente para cada tipo de elemento, pero por tener un valor poco representativo se estima como \$0.03/m². Este valor debe ser afectado por el metrado total de encofrado ejecutado, ó la cantidad de metros cuadrados encofrados, por lo que el metrado de encofrado lateral de cada elemento debe ser afectado por este valor de costo unitario para obtener el costo total de consumibles en el elemento de concreto armado.

La figura 5.26 detalla el flujo de trabajo para calcular y almacenar los costos de consumibles para los encofrados laterales utilizando ratios referenciales de una base de datos en Excel. Primero el flujo obtiene los metrados de los elementos placas, columnas y vigas. Luego multiplica las áreas de estos elementos correspondientes al encofrado lateral y los multiplica por el factor de costo de consumibles de PVC. El resultado es almacenado en el parámetro costos de consumibles de cada elemento de concreto armado en el modelo BIM.

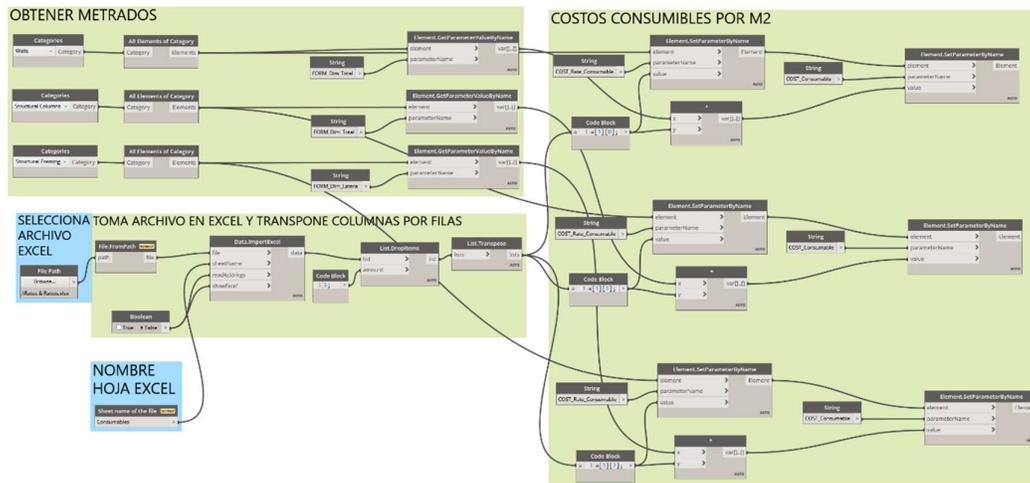


Figura 5.26. Dynamo Script para el cálculo de consumibles de encofrado.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de los costos de alquiler de los encofrados se ha recolectado registros de costos alquiler de diferentes proveedores resumidos en la tabla 5.14 detallando el costo para cada sistema y para cada tipo de altura (Simple, Doble, y Triple). Así mismo en la tabla 5.15 se han registrado los costos unitarios de alquiler para los sistemas de costados de viga para diferentes peraltes. Y en la figura 5.27 se detalla el flujo en Dynamo para automatizar el cálculo de costos de alquiler para sistemas de encofrados y los sistemas para re-apuntalamiento.

Tabla 5.14. Costos unitarios de alquiler para cada sistema de encofrado Peri de proyecto Neo 10.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de sistema	Unid	\$/unid/día Simple	\$/unid/día Doble	\$/unid/día Triple
Cimentaciones	m ²	0.95	-	-
Columnas	m ²	0.57	0.29	0.40
Placas	m ²	0.57	0.25	0.28
Soporte de Losa	m ²	0.03	0.02	0.02
Soporte de viga	m	0.53	0.43	0.46
Apuntalamiento de losa	m ²	0.01	0.01	0.01
Apuntalamiento de viga	m	0.27	0.21	0.23

Tabla 5.15. Costos de alquiler para costados de viga.

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de sistema	Unid	\$/unid/día T1	\$/unid/día T2	\$/unid/día T3	\$/unid/día T4
Costado de Viga	m2	0.28	0.24	0.09	0.05

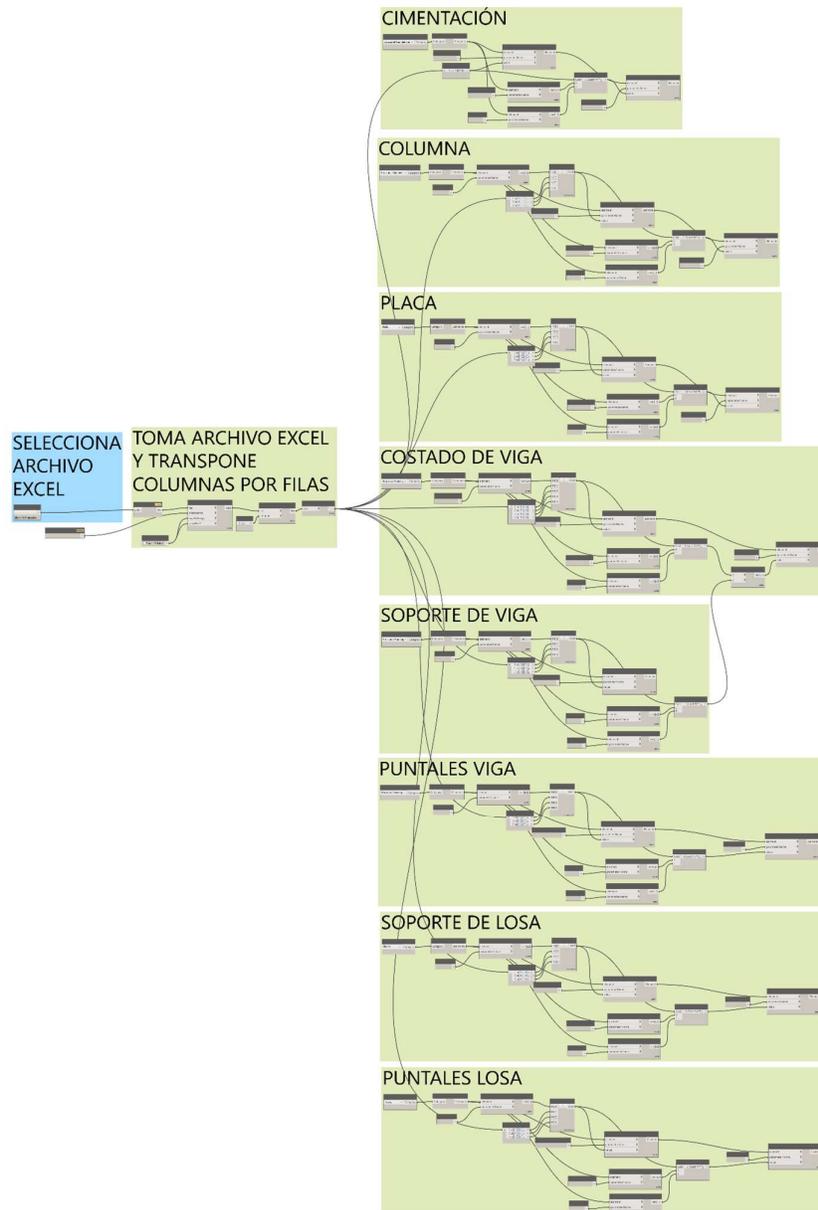


Figura 5.27. Dynamo script para calculo alquiler de encofrados.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Procesamiento de la información

En la presente sección se detalla el procesamiento de la información recolectada en los parámetros de los modelos BIM. El procesamiento de la información se desarrolló en un modelo simple para simplificar la explicación de los pasos. Sin embargo, los resultados de las unidades de análisis serán presentados en el siguiente capítulo.

5.4.1. Cálculo de metrados de encofrados

De la recolección de datos, para cualquier modelo en cual se ejecuten todos los Dynamo scripts de la sección anterior, se obtiene un modelo BIM con todos sus parámetros calculados. Teniendo todos los parámetros calculados se extrae toda la información utilizando tablas de cuantificación. La figura 5.28 muestra un ejemplo de las tablas obtenidas de un modelo BIM de prueba (detallado en parte inferior derecha). En la parte izquierda esta la tabla de cuantificación resumida por solución y secuencia de vaciado (metrado por sectores). En la parte superior derecha se detalla la tabla de cuantificación resumida por tipo de encofrado o sistema.

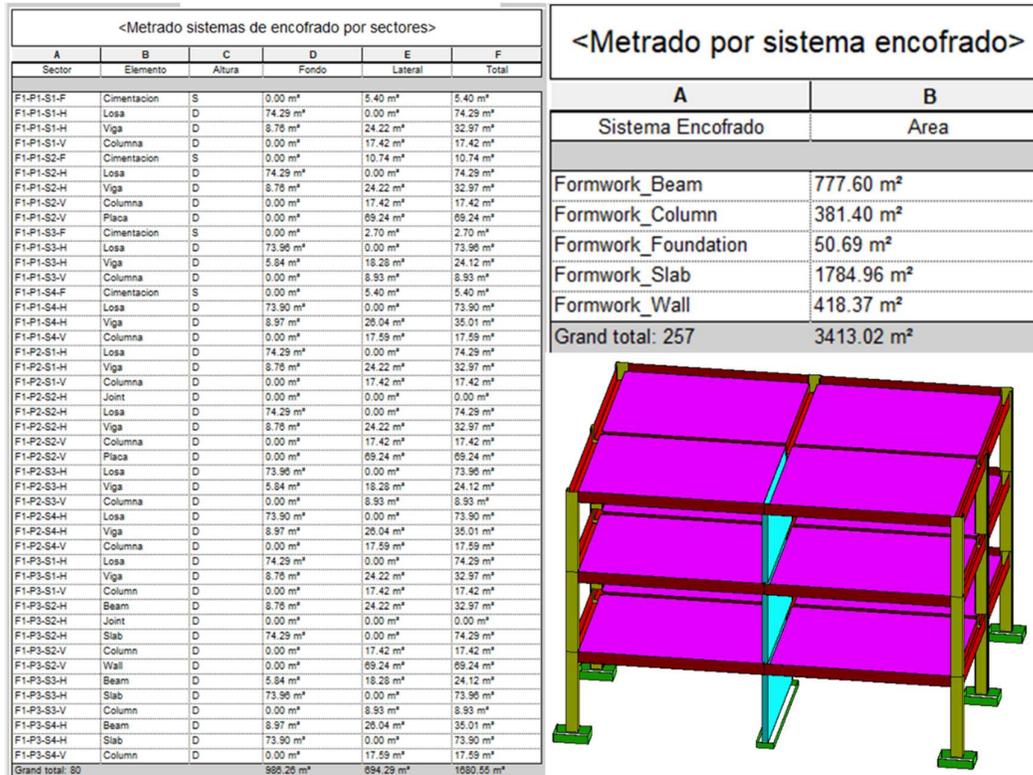


Figura 5.28. Tablas de cuantificación de modelo BIM.

Fuente: Elaboración propia.

También se automatizó el procesamiento y extracción de la información de los metrados del modelo ya que ahora el modelo está cargado con toda la información necesaria. En la

figura 5.29 se detalla el flujo de trabajo en Dynamo para la extracción de los metrados de concreto, encofrado, acero (por ratios) y horas hombre del modelo de concreto armado. En el flujo primero se seleccionan todos los elementos por categoría, luego se crea una lista con ellos y luego se realiza la sumatoria de los valores por partida encofrado, concreto, acero, y horas hombre. Luego los resultados son presentados en un cuadro de dialogo.



Figura 5.29. Dynamo Script para cálculo de metrados.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del cuadro de dialogo son computados y presentados utilizando un cuadro de dialogo el cual es preparado utilizando un nodo codificado con Python. La figura 5.30 presenta los metrados detallando que los metrados de concreto y encofrado son calculados utilizando las medidas geométricas del modelo BIM. Por otro lado, el acero es calculado en base a las cuantías de acero del proyecto Neo 10, al igual que las horas hombre que son estimadas utilizando índices de productividad.

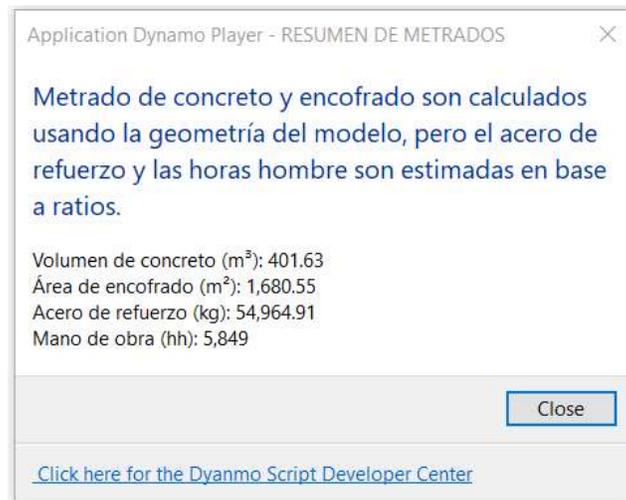


Figura 5.30. Resultados de Dynamo Script para resumen de metrados.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.31 se muestra el flujo de trabajo en Dynamo para procesar y presentar los resultados de los metrados de encofrados disgregados. El bloque de nodos de la izquierda suma los encofrados agrupando los metrados por sistema de encofrado. En segundo bloque en la parte superior derecha totaliza los costos de consumibles, el siguiente los costos de alquiler de los sistemas de apuntalamiento. El ultimo bloque de la derecha calcula la sumatoria del área de encofrado, la sumatoria de costos de alquiler, y la sumatoria de costo de mano de obra. Al final todos estos valores son presentados a través de un nodo programado con Python para presentarlos en un cuadro de dialogo.

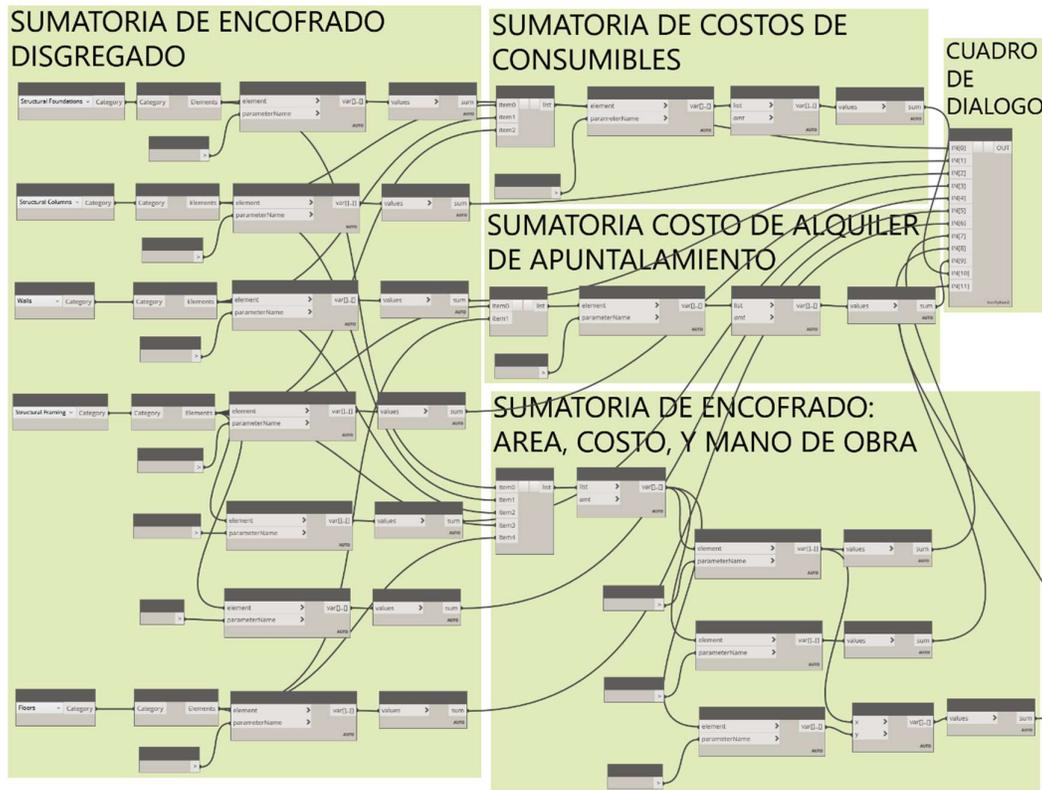


Figura 5.31. Dynamo script para metrados disgregados.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.32 se muestran los resultados de procesar los metrados y presentarlos organizados en un cuadro de dialogo ordenados y disgregado por tipo de sistema. Así mismo se ha resumido los resultados relacionados a los costos del encofrado como es el costo de alquiler de sistemas de encofrado, costos de alquiler de sistemas de apuntalamiento, y costo por compra de consumibles. Así mismo un estimado de la cantidad de horas hombre requeridas para ejecutar la partida de encofrado de todo el modelo BIM de concreto armado.

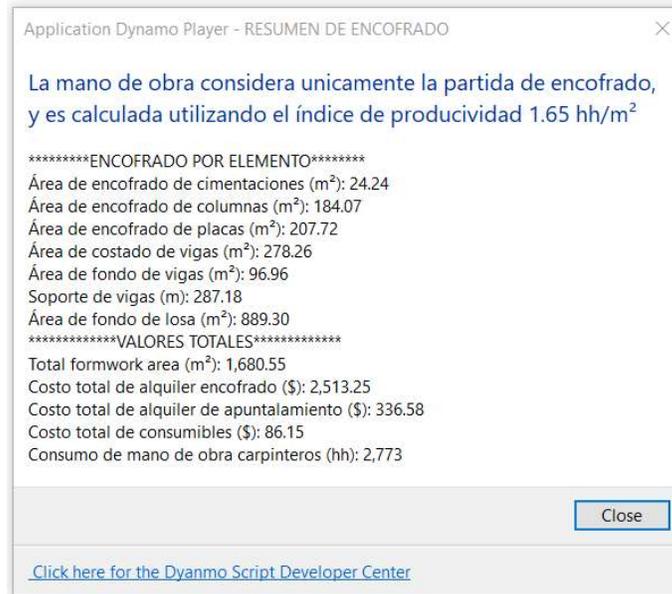


Figura 5.32. Resultados de resumen de encofrado disgregado.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2. Curva de demanda de encofrados y puesta máxima

El uso de encofrados es variable a lo largo de la ejecución de un proyecto de edificaciones debido a que cada uno de los sectores de encofrado no tiene exactamente la misma cantidad de metros cuadrados a encofrar en todos los sectores de vaciado. Sin embargo, existe una tendencia de la curva en la cual al inicio del proyecto se utiliza una cantidad de metros cuadrados que va en aumento hasta alcanzar un pico en el cual se mantiene estable con variación mínima. A este pico de uso de encofrado con poca variabilidad se le conoce como “Demanda Máxima” (ver figura 5.3). Luego de que se terminan los vaciados y se comienza el desencofrado de los últimos sectores de vaciados para devolver el encofrado a sus proveedores.

El cálculo de la cantidad de metros cuadrados de encofrados requeridos en cualquier momento del proyecto se determina sumando todos los metros cuadrados de encofrados en proceso de armado e instalación para vaciar un nuevo sector, más los metros cuadrados necesarios para sostener a los sectores anteriores ya vaciados pero que aún no han alcanzado suficiente resistencia para ser desencofrados y finalmente sumando los metros cuadrados de encofrado que se encuentran en proceso de desencofrado para ser reutilizado en un nuevo sector.

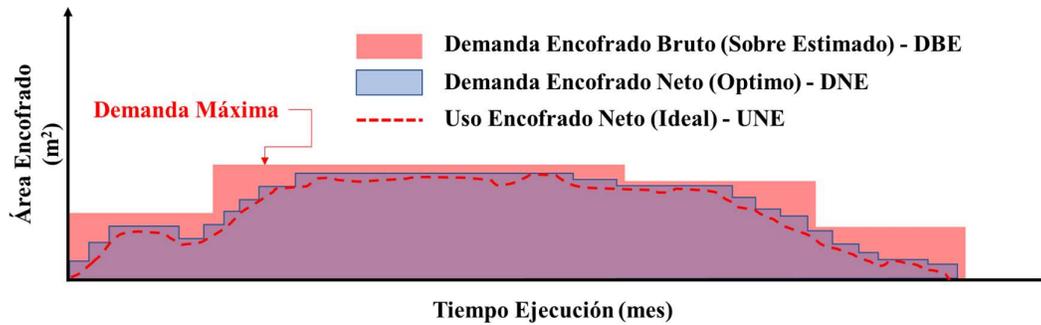


Figura 5.33. Curva de demanda y uso de encofrado.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.3. se detalla con una línea discontinua color rojo el encofrado neto (UNE) que idealmente se utiliza y no considera las piezas de encofrado que se encuentran en obra pero que no se están utilizando. Es común que por las modulaciones de encofrado siempre existan piezas que no se utilizan en todos los sectores, pero se necesitarán en sectores próximos. Por económica es más eficiente tener piezas de encofrado en espera por unos días en lugar devolverlos y pagar múltiples movilizaciones, o peor aún arriesgar que las piezas no estén disponibles nuevamente cuando se requieran en obra.

El área achurada en azul representa la real demanda de encofrado neto (DNE) considerando que existe una cantidad mínima de encofrado que no será utilizando todos los días debido a las diferencias de metrados entre sectores y a las modulaciones de encofrados. La forma de esta curva de demanda es de forma escalonada y no hay cambios fluctuantes como en la curva de uso anterior. Finalmente, el área achurada de rojo representa la real demanda de encofrado bruto (DBE) considerando que, en la práctica, los contratistas requieren encofrado adicional al óptimo para cubrir contingencias como que un sector de encofrado no haya alcanzado resistencia a tiempo o se haya retrasado el vaciado de un sector, o que se pierdan piezas durante el proceso y se requieran piezas adicionales.

La diferencia entre la demanda neta y bruta es la suma de encofrado de contingencia más cualquier encofrado extra que se alquila sin ser planificado. Una buena gestión de encofrados implica reducir esta diferencia a lo mínimo posible sin poner en riesgo el avance de la producción. Tener encofrado adicional que no está siendo utilizado no solo implica pagar por encofrado que no es está utilizando sino también que este encofrado este sujeto a robos, pérdidas, o daños que generarán altos sobrecostos al termino de obra. El área bajo cualquiera de las curvas (UNE, DNE, DBE) representa la cantidad de encofrado requerido durante el tiempo utilizado (m^2 -mes), y de afectarse para la tarifa de alquiler de cada uno de los sistemas de encofrado ($\$/m^2$ -mes) daría como resultado el costo total de encofrado alquilado (USD\$). Por ello la curva de encofrado debe representarse por separado para cada solución para afectar el área debajo de la curva por la correspondiente tarifa de cada sistema.

El proceso del cálculo de la puesta máxima se ha automatizado para calcular cuánto encofrado de cada sistema es requerido para ejecutar el proyecto siguiendo el cronograma propuesto, así como la sectorización planteada por el usuario. Con estas dos entradas se computaron todos los parámetros relacionados al encofrado en el modelo BIM y luego se ejecuta un Dynamo script para computar la puesta máxima de cada sistema. La puesta máxima se calcula para cada sistema por de forma independiente ya que cada sistema tiene una rotación diferente. En la figura 5.34 se muestra un ejemplo del cálculo de la puesta máxima con Dynamo para el caso de las cimentaciones.

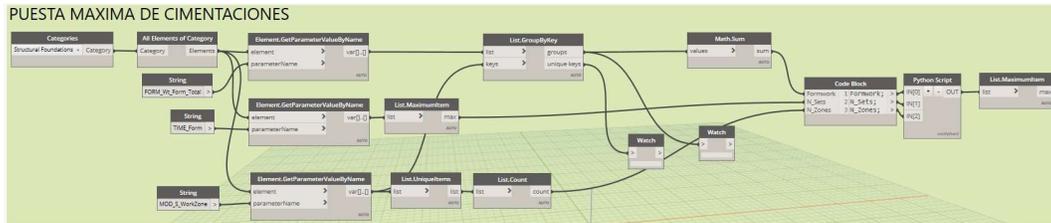


Figura 5.34. Dynamo Script para calcular puesta máxima de cimentaciones.

Fuente: Elaboración propia.

Como la implementación del cálculo de la puesta máxima de encofrado es un bucle iterativo de condicional “if” entonces es necesario hacer uso de un nodo en Python para codificar la rutina que permite identificar los sectores con la mayor área de la curva de demanda de encofrado. En la figura 5.35 se muestra la codificación utilizada en Python para encontrar la puesta máxima de encofrado para cualquier sistema de encofrado.

```

Python Script
1 # Load the Python Standard and DesignScript Libraries
2 import sys
3 import clr
4 clr.AddReference('ProtoGeometry')
5 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6
7 # The inputs to this node will be stored as a list in the IN variables.
8 dataEnteringNode = IN[0]
9
10 # Place your code below this line
11 Formwork = IN[0]
12 N_Sets = IN[1]
13 N_Zones = IN[2]
14 Max_Set = []
15
16 if (N_Sets > N_Zones):
17     N_Sets = N_Zones
18
19 n = N_Zones - N_Sets + 1
20
21 for i in range(int(n)):
22     Set = 0
23     for j in range(int(N_Sets)):
24         Set += Formwork[i+j]
25     Max_Set.append(Set)
26
27
28 # Assign your output to the OUT variable.
29 OUT = Max_Set
    
```

Figura 5.35. Nodo para calculo puesta máxima usando Python.

Fuente: Elaboración propia.

El script que calcula la puesta máxima de cada sistema de encofrado además calcula el requerimiento de planchas de triplay fenólico para fondear todas las losas. También el script calcula el peso total del encofrado a arrendar para estimar la cantidad de viajes de transportistas que serán necesarios con camión plataforma. La figura 5.36 muestra los resultados de estos cálculos en una ventana de dialogo que resumen los cálculos de la puesta máxima.

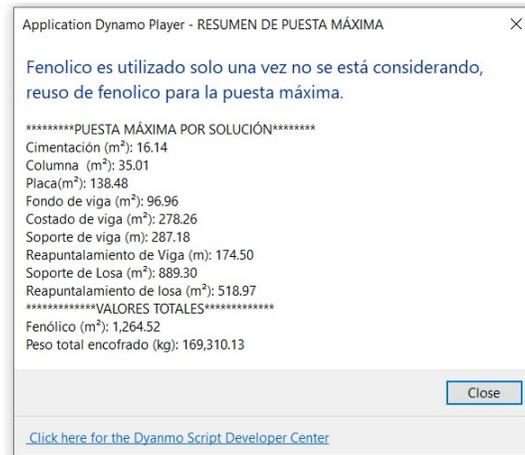


Figura 5.36. Resultado de cálculos de puesta máxima.

Fuente: Elaboración propia.

Con la información en el modelo se integra la información del modelo con otros programas como MS Project y Excel para plotear de forma detallada el consumo de encofrado en el tiempo, ya sea por sistema y expresado en m² o inclusive para todos los sistemas y expresado en dinero (USD\$). Figura 5.37 detalla un ejemplo obtenido del modelo de cómo se extrae de forma automatizada en Excel la curva de demanda del encofrado expresado en USD\$.

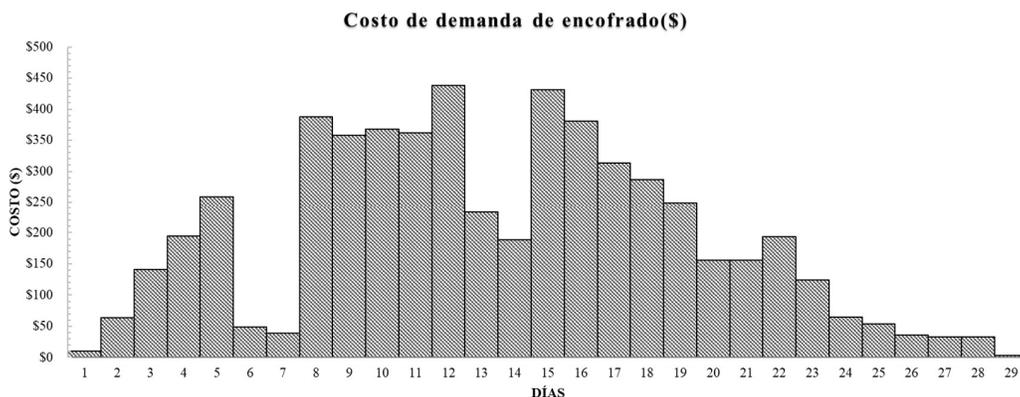


Figura 5.37. Curva de demanda de encofrado en USD\$.

Fuente: Elaboración propia.



5.4.3. Análisis de costo de encofrados

El costo total asociado al encofrado esta usualmente compuesto por una componente de mano de obra que suele ser la de mayor incidencia, seguido de la componente subcontrato, luego seguido de una componente materiales y finalmente por una pequeña componente de equipos. La componente mano de obra es el más importante en esta partida, y está directamente asociado a productividad obtenida con cierto tipo de encofrado. Hay ciertos tipos de encofrado que tienen una mayor demanda de mano de obra que otros como por ejemplo un encofrado manu portable. Por otro lado un encofrado pre armado que se iza con una torre grúa como un conjunto de piezas que solo deben ajustarse y asegurarse una vez ubicados en la posición final de uso tiene una demanda de horas hombre mucho menor. La componente mano de obra se calcula utilizando la ecuación 5.1.

$$\text{Costo Mano de Obra (\$)} = IP \cdot PU \cdot \text{Area} \quad (5.5)$$

Donde:

IP = Índice de productividad en (hora hombre/m²)

P.U = Tarifa de la hora hombre en (\$/hora hombre)

El componente subcontrato esta principalmente conformado por el alquiler de los encofrados modulares prefabricados a una casa de encofrados como Peri, Doka, Ulma, Unispan, EFCO, Alsina, Forsa, etc. Esta componente también considera costos asociados a los cobros que realizan estos proveedores de encofrado por mantenimiento de los encofrados luego de su arriendo, así como de limpieza de entregarse en condiciones no acordadas en las condiciones contractuales de arriendo. Así mismo en este componente se consideran los cobros que realizan estas empresas de encofrados por penalidades relacionadas a la reposición de encofrado perdido o inservible. Finalmente, esta componente también considera los costos asociados al transporte del encofrado que generalmente son subcontratos como fletes de transporte desde el almacén de la empresa de encofrados hasta la obra y luego la ruta de regreso una vez finalizado la etapa de estructuras.

La tercera componente es la de los materiales, la cual considera los complementos de madera necesarios para el encofrado, las planchas de triplay fenólico, los accesorios y consumibles de encofrados y cualquier otro material de menos incidencia como alambre, clavos, tornillos. La madera de complemento es toda la madera que no está incluida en la solución de encofrado mostrada en los planos de montaje. Esto incluye cortes de vaciado, ochavos, estampados de superficie, negativos de vaciado, listones de madera para barandas etc. Los consumibles son materiales que normalmente tiene una cantidad mucho menor al resto del encofrado. Estos consumibles por su corta vida útil no se alquilan sino únicamente como venta. Estos consumibles incluyen materiales como tuberías de PVC para el pase de pasadores., fundas de PVC, conos de PVC, obturadores, tensores, corbatas, pines, grapas, etc.

La última componente es la de equipos y está compuesta por todos los equipos mayores, menores y herramientas cuyo alquiler son requeridos para la instalación de los encofrados. Algunos ejemplos de los costos incluidos en esta componente son el uso de la torre grúa para acarreo de encofrados, manipuladores telescópicos, mesas de corte, garlopas, etc. Generalmente para el análisis de costo de encofrados entre diferentes proveedores no es necesario incluir en el comparativo los costos de mano de obra debido a que todos los proveedores invitados deben alinearse a un tipo de encofrado seleccionado para las necesidades del proyecto por lo que deberían ser equivalentes. De igual forma se omite en el análisis de costo para el comparativo, el costo de equipos pues serán muy similares en cualquiera de los postores. Los costos que si serán muy variables dependiendo del proveedor de encofrado definitivamente serán el de subcontrato y el de materiales. La ecuación 5.2 representa todas las componentes de costo que deben considerarse como mínimo en un comparativo para evaluar las propuestas de proveedores de encofrados.

$$\text{Costo Encofrado} = \sum_{i=1}^7 C_i \quad (5.6)$$

Donde:

C_1 = Costo de alquiler de encofrado

C_2 = Costo de consumibles de encofrados

C_3 = Costo de madera de complemento

C_4 = Costo de planchas de triplay fenólico

C_5 = Costo de mantenimiento y limpieza

C_6 = Costo de reposición por pérdida y daños

C_7 = Costo de fletes de transporte

5.4.4. Indicadores de desempeño para encofrados

Los indicadores de desempeño también conocidos como KPIs por sus siglas en inglés, son valores numéricos que sirven para medir el eficiente uso de los sistemas de encofrados. Los indicadores de desempeño propuestos para la presente investigación son: Costo Unitario (CU), Factor Rotación (FR), y Factor de Eficiencia (FE). El costo unitario (CU) es el resultado del costo total del encofrado dividido por el total de metros cuadrados a encofrar en la edificación. CU se expresa en (\$/m²) y se representa con la ecuación 5.3. Este valor es un excelente indicador cuando se comparan alternativas entre diferentes proveedores de encofrado y definir quién es el proveedor con la menor propuesta económica. De igual forma este indicador se utiliza como referencia para comparar diferentes proyectos, y para realizar estimaciones futuras. La interpretación de este indicador es “*CU es la cantidad de dólares invertidos para encofrar un metro cuadrado de encofrado en el proyecto*”.

$$CU = \frac{\sum_{i=1}^7 C_i}{Area\ Total\ Encofrada} \quad (5.7)$$

El Factor de Rotación (FR) es la división de la cantidad de vaciados realizados con un sistema de encofrado dividido por la cantidad de juegos de encofrado utilizados para realizar esa cantidad de vaciados. FR es un indicador adimensional y se representa con la ecuación 5.4. Este valor es diferente para cada solución de encofrado, especialmente entre elementos horizontales y verticales. Los elementos verticales suelen tener una rotación mucho mayor los elementos horizontales debido a que sus tiempos de desencofrado son mucho menores. El problema de este indicador es que no combina diferentes sistemas de encofrados como el caso de CU o FE. La interpretación de este indicador es “FR es la cantidad de vaciados que se pueden realizar con un juego de solución de encofrado”.

$$FR = \frac{Numero\ de\ vaciados}{Cantidad\ de\ Juegos\ de\ Encofrados} \quad (5.8)$$

El Factor de Eficiencia (FE) es la división de la cantidad de metros cuadrados encofrados en total dividido por la cantidad de metros cuadrados de encofrados utilizados. FE es un indicador adimensional y se calcula con la ecuación 5.5. FE mide la verdadera eficiencia de uso del encofrado a diferencia del CU que tiene una componente de los precios del mercado. Así mismo FE permite combinar la eficiencia de uso de los diferentes sistemas de encofrados sin importar sean verticales u horizontales, a diferencia del FR. La interpretación de este indicador es “FE es la cantidad de metros cuadrados que se pueden encofrar con un metro cuadrado de encofrado disponible”.

$$FE = \frac{Area\ total\ a\ encofrar\ en\ el\ proyecto}{Area\ total\ de\ encofrado\ alquilado} \quad (5.9)$$

El cálculo de estos Indicadores de Desempeño (KPIs) es muy laborioso y de calcularse múltiples veces para diferentes alternativas o análisis de encofrado genera inclusive error humano. En la figura 5.38 se muestra una parte de las redes de nodos para calcular los KPIs. El Costo Unitario (CU) es el indicador más laborioso debido que requiere de muchos valores de entrada y variables. La ecuación 5.10 detalla como el script calcula el valor de este KPI.

$$Costo\ total\ Encofrado = \sum_{i=1}^6 C_i \quad (5.10)$$

Donde:

$$C_1 = Costo\ Alquiler\ Sistemas\ Encofrado$$

$$C_2 = Costo\ Alquiler\ Sistemas\ Apuntalamiento$$

$$C_3 = Costo\ de\ mano\ de\ obra = Metrado_{Enc} \cdot IP_{Enc} \cdot Tarifa_{MO}$$

$$C_4 = Costo\ consumibles$$

$$C_5 = \text{Costo de fenólico} = (\text{Costo Felte}) \cdot \frac{\sum_{i=1}^8 P_i}{\text{Capacidad Camión}}$$

$P_1 =$ Peso de puesta máxima encofrado cimentaciones

$P_2 =$ Peso de puesta máxima encofrado columnas

$P_3 =$ Peso de puesta máxima encofrado placas

$P_4 =$ Peso de puesta máxima encofrado costado de vigas

$P_5 =$ Peso de puesta máxima soporte de vigas

$P_6 =$ Peso de puesta máxima puesta de puntales para vigas

$P_7 =$ Peso de puesta máxima soporte de losas

$P_8 =$ Peso de puesta máxima de puntales para losas

$$C_6 = \text{Costo fenólico} = (\text{Costo Fenólico}) \cdot \sum_{i=1}^5 M_i$$

$M_1 =$ Puesta Maxima Encofrado de losa

$M_2 =$ Puesta Maxima Encofrado costado de viga

$M_3 =$ Puesta Maxima Encofrado fondo de viga

$M_4 =$ Puesta Maxima Encofrado nudo columna

$M_5 =$ Puesta Maxima Encofrado nudo placa

Todas las variables relacionadas a áreas, pesos, rendimientos de mano de obra, costo de consumibles, y costos de alquiler ya se encontraban cargadas en el modelo BIM, sin embargo, algunas variables adicionales deben ser ingresadas dentro del algoritmo como datos de entrada para ejecutar el Dynamo script que calcular de forma automática el Costo Unitario (CU). El costo de fenólico considerado es USD\$ 9.60/m², la tarifa de mano de obra considerado es USD\$ 5.60 (referencia Proyecto Neo10), y el costo del flete de un camión plataforma de 28 ton de capacidad es USD\$ 430 por una ruta dentro de Lima metropolitana de ida y vuelta.

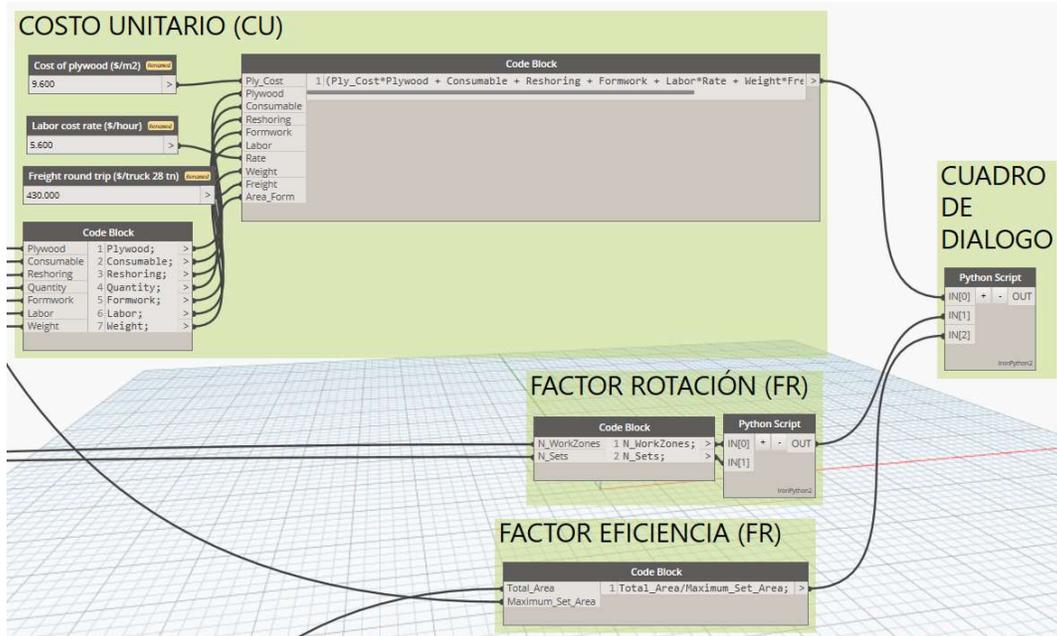


Figura 5.38. Dynamo Script para cálculo de KPIs.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.39 se muestran los resultados de ejecutar el Dynamo script para calcular los KPIs. Estos valores son calculados de forma automática y con datos de entrada preconfigurados pero que son editados según los requerimientos de cada proyecto nuevo. En este caso la herramienta ha sido configurada con valores adecuados para el proyecto NEO 10 que es el sujeto de estudio de la presente investigación.

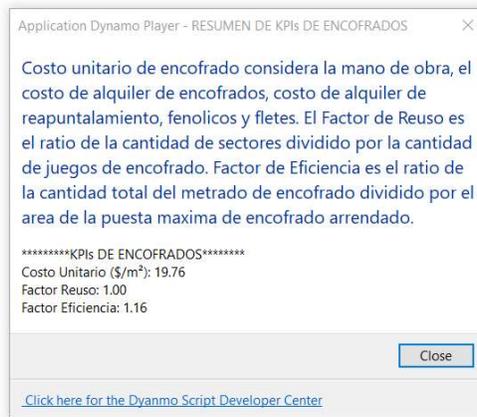


Figura 5.39. Resultados del script con KPIs de Encofrados.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.5. Proceso de Análisis Jerárquico

El primer paso en el procesamiento del modelo de evaluación basado en el método “Proceso de Análisis Jerárquico” (AHP) es esquematizar los niveles del proceso de selección. En la figura 5.40 se detalla el esquema de las jerarquías para evaluar proveedores de encofrados. La primera jerarquía son los criterios de selección que se han propuesto. El primer criterio es el costo de alquiler del equipo de encofrado, que en este caso son las cotizaciones propuestas por cada uno de los postores. El segundo criterio es la productividad relacionada a cada sistema de encofrado, ya que algunos sistemas permiten un mejor rendimiento de la mano de obra. El tercer criterio es el rendimiento de la torre grúa y la dependencia del sistema para trabajar únicamente con la grúa, esto está relacionado al peso del encofrado. El cuarto criterio es el nivel de acabado que se logra en la superficie del elemento de concreto armado con el encofrado propuesto. La segunda jerarquía son las alternativas y en este caso se ha cotizado con diferentes empresas de encofrado y en base a las fichas técnicas e inspección de las formas propuestas se ha evaluado cada uno de los otros criterios.

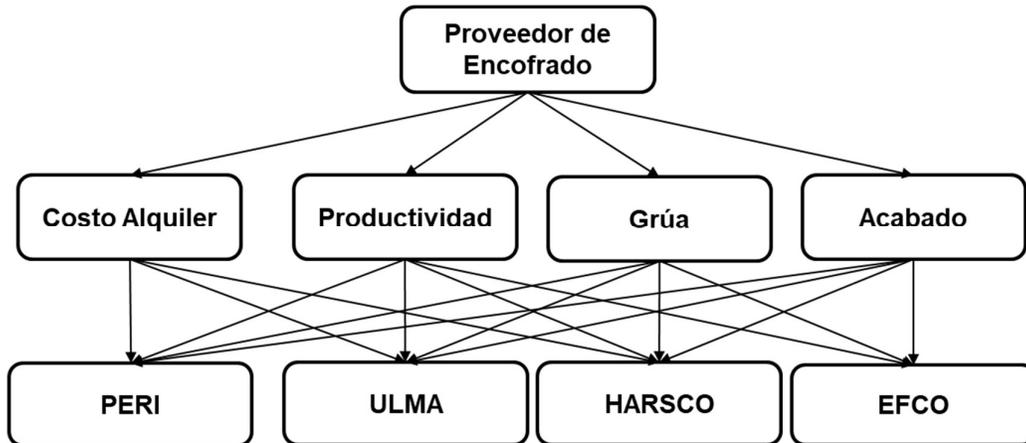


Figura 5.40. Esquema Jerárquico Encofrados NEO 10.

Fuente: Elaboración propia.

El segundo paso es establecer la ponderación de importancia entre los 4 criterios propuestos. Para ello se utiliza la escala de Saaty y se comparan en pares todos los criterios. Estos valores son organizados en una matriz. Para establecer la ponderación entre los 4 criterios mencionados, se ha evaluado el presupuesto del Proyecto Neo 10 (Ver Anexo 2). La tabla 5.16 detalla los precios unitarios con las partidas directamente relacionadas con cada uno de los criterios de selección. Los criterios de selección y los recursos relacionados del presupuesto con estos criterios están detallados en la primera columna. Para el costo, se ha relacionado con el alquiler del equipo de encofrado, para la productividad con el costo de la mano de obra en carpintería, para la torre grúa el costo asociado a acarreos con torre grúa y para el acabado de la superficie la partida de reparaciones y solaqueo de concreto armado.

Tabla 5.16. Precios unitarios de criterios de selección.

Fuente: Elaboración propia.

Recurso	Und	Cantidad /m ²	P.U (USD)	\$/m ²
Alquiler encofrado	m2	1.00	3.76	3.76
Mano de Obra	hh	1.07	4.99	5.33
Grúa Torre	hm	0.05	38.14	2.05
Solaqueo	m2	0.89	3.83	3.39

Con estos resultados se ha establecido la siguiente matriz $MZ_{1,4}$ en la que se comparan en pares cada uno de los criterios anteriores. En la tabla 5.17 se detalla los valores de esta matriz utilizando la escala de Saaty. En la tabla 5.18 se detalla el proceso del cálculo del vector principal de la matriz de ponderación de criterios.

Tabla 5.17. Matriz de ponderación de criterios.

Fuente: Elaboración propia.

	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	
Z ₁	1	1/2	4	2	Costo
Z ₂	2	1	6	3	Productividad
Z ₃	1/4	1/6	1	1/4	Grúa
Z ₄	1/2	1/3	4	1	Acabado
Suma	3.750	2.000	15.000	6.250	

Tabla 5.18. Cálculo de vector principal de matriz de criterios.

Fuente: Elaboración propia.

	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
Z ₁	0.267	0.250	0.267	0.320	0.276	1.135	4.115
Z ₂	0.533	0.500	0.400	0.480	0.478	1.960	4.098
Z ₃	0.067	0.083	0.067	0.040	0.064	0.258	4.025
Z ₄	0.133	0.167	0.267	0.160	0.182	0.736	4.050
							4.072

El siguiente paso es calcular las matrices de comparación por pares (MCP) para cada uno de los criterios. Para ello se han establecido relaciones de costo entre cada una de las alternativas de proveedores de encofrados en base a cada uno de los criterios y utilizando el presupuesto del proyecto Neo 10 como base de datos. La tabla 5.19 detalla la relación de los costos unitarios de cada una de las alternativas de alquiler de encofrados y sistemas de reapuntalamiento. La tabla 5.20 detalla los rendimientos ponderados con cada uno de los sistemas de proveedores de encofrados y para la tabla 5.21 se detallan los pesos por metro cuadrado de los sistemas de encofrados ponderados.

Tabla 5.19. Costo Unitario de alquiler de encofrado y puntales.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Metrado	PERI r ₁₁	ULMA r ₁₂	HARSCO r ₁₃	EFCO r ₁₄
Muros	2,529.98	4.10	2.13	2.24	3.60
Columnas	456.23	3.91	1.63	2.00	4.25
Placas	32,706.08	2.68	1.16	1.45	1.58
Losas macizas	4,030.20	2.24	3.19	2.43	4.13
Losas Firth	11,935.51	1.37	2.97	1.68	3.11
Vigas	4,204.76	12.84	23.04	11.64	22.23
Ponderación	55,862.76	3.21	3.39	2.38	3.76

Tabla 5.20. Rendimientos sugeridos por día.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Metrado	PERI r ₁₁	ULMA r ₁₂	HARSCO r ₁₃	EFCO r ₁₄
Columnas	456.23	55	45	40	40
Placas	32,706.08	55	45	40	40
Losas Macizas	4,030.20	85	65	70	70
Losas Firth	11,935.51	85	65	70	70
Vigas	4,204.76	95	40	70	40
Ponderación	53,332.78	67	51	51	49

Tabla 5.21. Pesos por metro cuadrado de cada sistema de encofrado.

Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Metrado	PERI r ₂₁	ULMA r ₂₂	HARSCO r ₂₃	EFCO r ₂₄
Muro Pantalla	2,529.98	65	100	100	125
Columnas	456.23	107	77	65	45
Placas	32,706.08	55	64	45	35
Losas Macizas	4,030.20	30	54	45	35
Losas Firth	11,935.51	30	54	35	35
Vigas	4,204.76	35	60	50	48
Ponderación	55,862.76	47	63	46	40

Con todos los valores anteriores se establecen las matrices de comparación por pares. La tabla 5.22 detalla la matriz de comparación por pares MCP con respecto a Z_1 (Costo alquiler). La tabla 5.23 detalla la matriz de comparación por pares MCP con respecto a Z_2 (Productividad). La tabla 5.24 detalla la matriz de comparación por pares MCP con respecto a Z_3 (Uso de grúa). La tabla 5.25 detalla la matriz de comparación por pares MCP con respecto a Z_4 (Acabado superficie de concreto).

Tabla 5.22. MCP con respecto a criterio Z_1 - "Costo".

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	2	1/2	4
A ₂	1/2	1	1/4	2
A ₃	2	4	1	8
A ₄	1/4	1/2	1/8	1
Suma	3.750	7.500	1.875	15.000

Tabla 5.23. MCP con respecto a criterio Z_2 - Productividad.

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	4	4	8
A ₂	1/4	1	1	4
A ₃	1/4	1	1	3
A ₄	1/8	1/4	1/3	1
Suma	1.625	6.250	6.333	16.000

Tabla 5.24. MCP con respecto a criterio Z_3 – Grúa.

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	4	1/2	1/4
A ₂	1/4	1	1/4	1/8
A ₃	2	4	1	1/2
A ₄	4	8	2	1
Suma	7.250	17.000	3.750	1.875

Tabla 5.25. MCP con respecto a criterio Z_4 - Acabado.

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	3	6	8
A ₂	1/3	1	2	3
A ₃	1/6	1/2	1	2
A ₄	1/8	1/3	1/2	1
Suma	1.625	4.833	9.500	14.000

El siguiente paso es calcular el vector principal de cada una de las matrices de comparación al igual como se hizo con la matriz de ponderación de criterios MZ_{1-4} . La tabla 5.26 detalla el vector principal de MCP respecto a Z_1 (Costo), la tabla 5.27 respecto

a Z_2 (Productividad), la tabla 5.28 respecto a Z_3 (Grúa), y la tabla 5.29 respecto a Z_4 (Acabados).

Tabla 5.26. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_1 (Costo).

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	1.067	4.000
A ₂	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.533	4.000
A ₃	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	2.133	4.000
A ₄	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.267	4.000
							4.000

Tabla 5.27. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_2 (Productividad).

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.615	0.640	0.632	0.500	0.597	2.442	4.092
A ₂	0.154	0.160	0.158	0.250	0.180	0.726	4.026
A ₃	0.154	0.160	0.158	0.188	0.165	0.668	4.056
A ₄	0.077	0.040	0.053	0.063	0.058	0.233	4.010
							4.058

Tabla 5.28. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_3 (Grúa).

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.138	0.235	0.133	0.133	0.160	0.648	4.049
A ₂	0.034	0.059	0.067	0.067	0.057	0.227	4.010
A ₃	0.276	0.235	0.267	0.267	0.261	1.069	4.093
A ₄	0.552	0.471	0.533	0.533	0.522	2.138	4.093
							4.051

Tabla 5.29. Cálculo de vector principal de MCP respecto a Z_4 (Acabado).

Fuente: Elaboración propia.

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.615	0.621	0.632	0.571	0.610	2.458	4.032
A ₂	0.205	0.207	0.211	0.214	0.209	0.842	4.025
A ₃	0.103	0.103	0.105	0.143	0.114	0.455	4.005
A ₄	0.077	0.069	0.053	0.071	0.067	0.270	4.004
							4.021

El siguiente paso es validar la consistencia de los criterios de evaluación y de las matrices de comparación por pares. Para el caso de la matriz de ponderación de criterios MZ_{1-4} se

ha calculado el λ_{\max} , así como el índice de consistencia (IC), así como el índice de consistencia aleatoria (CA), y el ratio de consistencia (RC). De la evaluación de estos valores se concluye que la ponderación de los criterios de evaluación Z_1 , Z_2 , Z_3 , y Z_4 ha sido consistente.

$$MZ_{1-4} \lambda_{\max} = 4.072, IC = 0.024, CA=0.890, RC = 2.70\% < 9\%$$

De forma similar se ha evaluado la consistencia de la matriz de comparación por pares con respecto a cada uno de los atributos Z_1 (Costo), Z_2 (Productividad), Z_3 (Grúa), y Z_4 (Acabados).

$$MCP Z_1 \lambda_{\max} = 4.000, IC = 0.000, CA=0.890, RC = 0.00\% < 9\%$$

$$MCP Z_2 \lambda_{\max} = 4.058, IC = 0.029, CA=0.890, RC = 3.26\% < 9\%$$

$$MCP Z_3 \lambda_{\max} = 4.051, IC = 0.025, CA=0.890, RC = 2.85\% < 9\%$$

$$MCP Z_4 \lambda_{\max} = 4.021, IC = 0.010, CA=0.890, RC = 1.16\% < 9\%$$

El último paso del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) con los criterios de evaluación de proveedores de encofrados consiste en multiplicar la matriz de comparación por pares con el vector de ponderación de criterios de evaluación. La matriz de comparación por pares es el resultado de unir en una matriz cuadrada de 4x4, los vectores promedios con respecto a cada uno de los criterios de evaluación. La ecuación representa la operación de matricial de la matriz de comparación por pares multiplicada por el vector de ponderación de criterios.

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{matrix} \begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \\ 0.267 & 0.597 & 0.160 & 0.610 \\ 0.133 & 0.180 & 0.057 & 0.209 \\ 0.533 & 0.165 & 0.261 & 0.114 \\ 0.067 & 0.058 & 0.522 & 0.067 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Z \\ 0.276 \\ 0.165 \\ 0.064 \\ 0.182 \end{pmatrix} = \begin{matrix} \text{Alternativa 1: (A1) PERI} \\ \text{Alternativa 2: (A2) ULMA} \\ \text{Alternativa 3: (A3) HARSCO} \\ \text{Alternativa 4: (A4) EFCO} \end{matrix} \begin{pmatrix} AZ \cdot Z \\ 0.480 \\ 0.165 \\ 0.263 \\ 0.092 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Con todo el proceso detallado se ha podido obtener una ponderación de cada una de las alternativas asignándole una evaluación numérica a cada una de las alternativas basado en todos los criterios de evaluación considerados en el método de selección. En el Anexo 4 se comparte las hojas de cálculo paso a paso de todo el “Proceso de Análisis Jerárquico” (AHP).

5.4.6. Seguridad y desastres naturales

Los modelos BIM tienen diferentes usos y según el alcance de estos usos pueden definirse las dimensiones del modelo. En la figura 5.41 se detalla todas las dimensiones posibles de un modelo BIM. En la presente tesis solo se ha llegado hasta la 5ta dimensión (Costo), pasando por todas las dimensiones anteriores como conceptual (1D), los planos (2D), el modelo digital (3D), y el cronograma (4D). Pero es posible llegar hasta una 8va dimensión que considera la Seguridad y Salud en el ciclo de vida de la edificación.

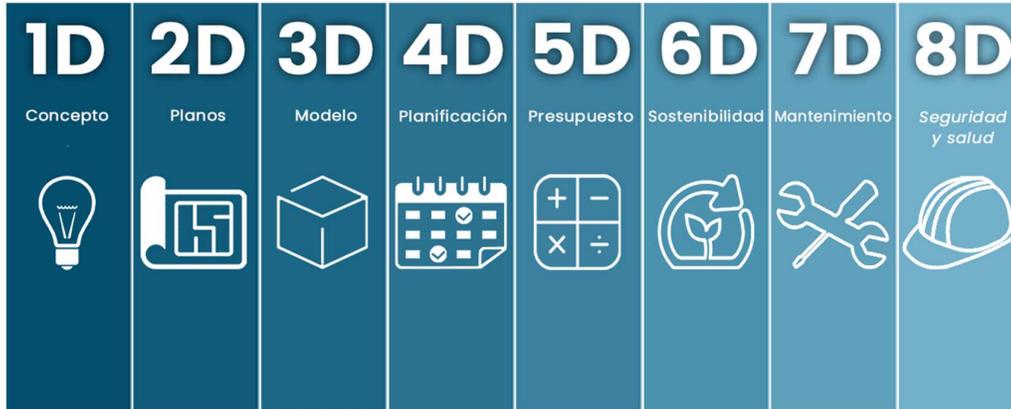


Figura 5.41. Dimensiones de un modelo BIM.

Fuente: 2020, Moret Salvador

El alcance del presente documento está basado en un LOD 200 y con usos hasta 5D para la gestión de los encofrados. Sin embargo, la implementación de la 8va dimensión es factible de realizar. Al igual como se crearon parámetros de costos y horas hombre se podría incluir un parámetro de “seguridad” relacionado al peso del encofrado, entendiéndose que encofrados más pesados involucrarían problemas de ergonomía en el trabajador. La figura 5.42 muestra los parámetros de peso del encofrado por m^2 para poder determinar si el encofrado puede ser acarreado por los trabajadores de forma manual e inclusive limitar la cantidad de m^2 de encofrado que pueden ser transportados manualmente. En esta figura se ve el peso de fondo de losa igual a 45kg por lo que debe ser cargado por 2 trabajadores como mínimo.

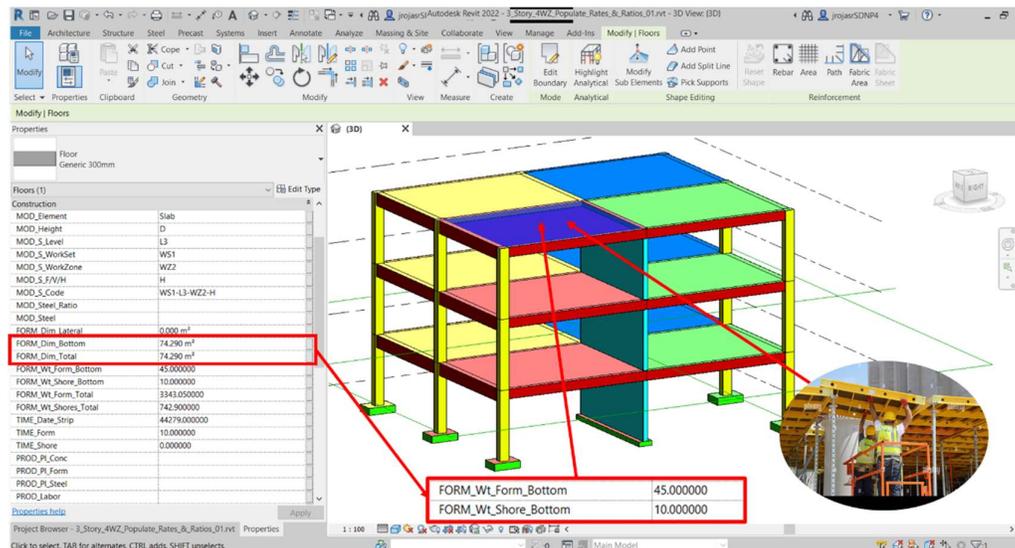


Figura 5.42. Gestión de riesgo por ergonomía.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la gestión BIM de encofrados para desastres naturales se ha realizado una revisión de las normas técnicas existentes relacionadas al diseño de encofrados. Las principales referencias identificadas son el estándar titulado “Encofrado para concreto” de la (ACI Committee 347, 2014) y el estándar “Cargas de diseño en estructuras temporales de construcción” de la (ASCE, 2014). En el primero se hace mención que para el diseño de encofrados las cargas horizontales a ser consideradas pueden ser vientos, cables en tensión, soportes inclinados, descarga del concreto al momento del vaciado, así como el arranque y frenado de vehículos durante el proceso de construcción. Así mismo hace referencia que para el diseño de fuerzas horizontales, se debe considerar el arriostre de los encofrados. Los encofrados homologados ya vienen diseñados para soportar estas cargas horizontales y de ser requerido serán complementados con sistemas de arriostre adicionales como anclajes a estructuras existentes de mayor rigidez. En la segunda referencia se cataloga a las fuerzas sísmicas como fuerzas ambientales. En esta referencia se menciona que solo se debe considerar la carga de viento o la carga de fuerzas sísmicas, pero nunca ambas cargas en simultaneo. Así mismo el ASCE indica que por considerarse los encofrados como una estructura que existe en un periodo muy corto y los eventos sísmicos de gran intensidad ocurren con poca frecuencia, todas las obras temporales deberán considerarse como “Categoría de Riesgo Tipo 2”. Esta categoría considera que, durante la construcción, la edificación aun no alberga a sus ocupantes por lo que el riesgo es bajo. Finalmente, también se indica que en zonas donde la probabilidad de un terremoto de gran intensidad es bajo se debe ignorar toda carga sísmica en el diseño.

Como el Perú es un país con zonas altamente sísmicas se debe puntualizar que se debe considerar diseñar los encofrados para soportar estas cargas horizontales. Este diseño obedece únicamente al arriostramiento de la estructura. Debido a que los encofrados son estructuras ligeras, las fuerzas que los afectan también son proporcionales en magnitud. En este caso se debe tener especial cuidado de arriostar las estructuras si estas son de gran altura para asegurar su estabilidad. En edificaciones, las alturas de encofrado suelen ser no mayores a los 5 metros por lo que los arriostres con los que ya vienen incorporados los sistemas de encofrados horizontales son suficientes para soportar las cargas sísmicas sin necesidad de empotrar la estructura al terreno. En el caso de andamios de fachada se recomienda arriostar la estructura temporal a la estructura de concreto del edificio.

Teniendo en consideración que el arriostre es crítico de inspección para sistemas de apuntalamiento, especialmente en caso de un evento sísmico de gran intensidad, otra posible implementación de medidas de seguridad y mitigación de desastres naturales es la utilización de un parámetro de “arriostre” para poder identificar si algún elemento encofrado no ha sido inspeccionado y lanzar una alerta de este problema. Algunos elementos como las torres de apuntalamiento de gran altura pueden ser críticos para considerar inspecciones periódicas por lo que estos elementos horizontales podrían tener un parámetro que permita informar la fecha de la última inspección y lanzar una alerta si la inspección programada no ha sido realizada. En la figura 5.43 se detalla cómo se puede resaltar con un color rojo los elementos que no han sido inspeccionados en una fecha determinada. Esto puede ayudar a los encargados de monitorear la seguridad en obra que no se estén incumpliendo inspecciones de elementos de encofrados críticos en seguridad, o si no cuentan con los elementos de arriostre apropiados en caso de un evento sísmico. En la figura 5.43 se ha generado una alerta en rojo, de forma similar a como en el terreno

se instalan tarjetas de inspección para validar el estatus de un sistema de encofrados. Así como las tarjetas de inspección en campo, de forma muy similar se puede validar desde el modelo BIM si un sistema de encofrado en específico ha sido examinado antes de su uso y de forma periódica. En el caso de los encofrados una vez instalados deben ser inspeccionados antes del vaciado y esta herramienta BIM proporciona la ventaja de enviar una alerta visual en caso un sistema no haya sido examinado o no se reportó adecuadamente su inspección.

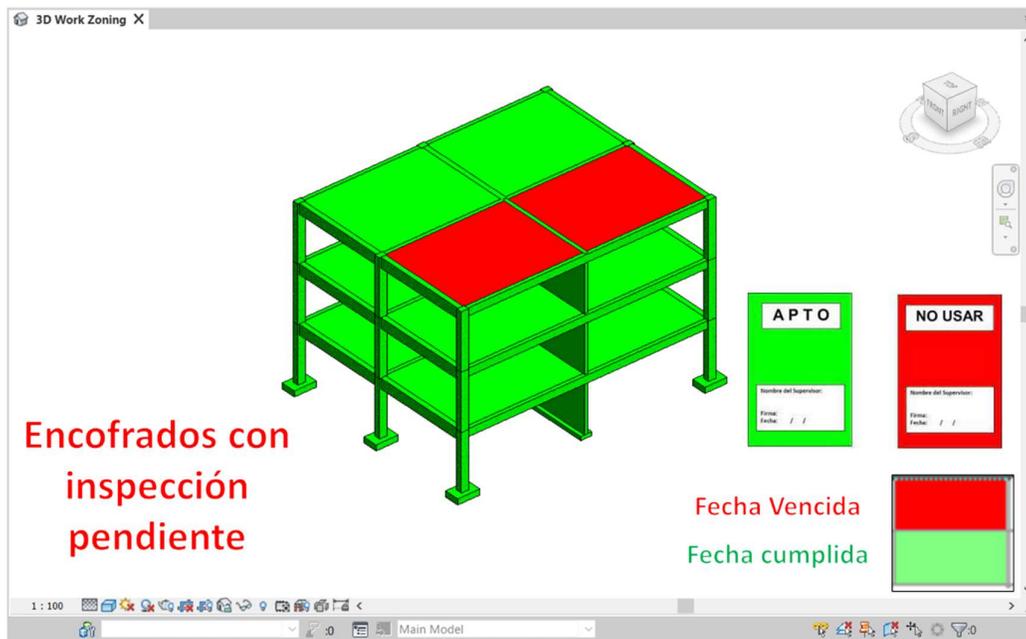


Figura 5.43. Mapeo BIM de elementos sin inspección de arrioste.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se detallan los resultados correspondientes a la evaluación del modelo con automatización BIM y métricas Lean para cuantificar cantidades y estimar costos, así como para el computo de los nuevos indicadores de desempeño propuestos en la presente tesis. Así mismo se presentan los resultados y el análisis correspondientes a la evaluación del modelo de evaluación de proveedores de encofrados utilizando el modelo de “Proceso de Análisis Jerárquico” (AHP). Para la evaluación de la herramienta BIM/Lean automatizada se tomó como sujeto de estudio a 2 modelos con la misma área techada y modulación de elementos estructurales (distribución estructural) pero con diferente cantidad de pisos. Además, los sectores (unidades de producción) son iguales solo variando en la cantidad de sectores por planta. Estos modelos BIM han sido planteados considerando que, por tener misma modulación, misma área techada y solo variando la cantidad de pisos, pero con la misma cantidad de sectores, la hipótesis para comprobar que la herramienta de automatización BIM está bien calibrada es comprobando que las métricas Lean/BIM son iguales o muy similares.

En el caso de la primera unidad de estudio se utilizó el modelo de 5 pisos, y con 16 sectores por planta. En este modelo se ejecutaron herramientas diseñadas con automatización BIM y se computó los tres indicadores de desempeño de la eficiencia del encofrado. El proceso de automatización BIM está detallado en la figura 6.1, en la cual de izquierda a derecha se detalla la evolución del modelo luego de ejecutado los Dynamo Scripts. Primero se inicia con el modelo sin ningún parámetro, segundo el modelo con la clasificación de elementos estructurales, tercero el modelo sectorizado (16 sectores por planta), y finalmente el modelado genérico del encofrado, así como el cálculo de todos los parámetros necesarios para la gestión de encofrados.

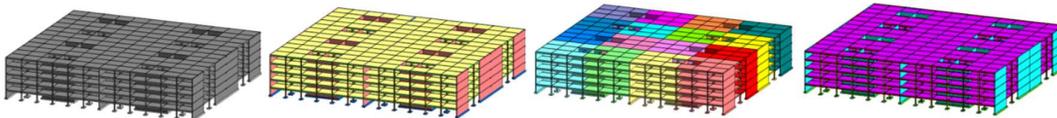


Figura 6.1. Flujo automatizado para modelado de encofrados en modelo de 5 pisos.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de 5 pisos luego de ejecutado todos los Dynamo Scripts necesarios está alimentado con toda la información para la gestión de encofrados y se pudo utilizar un nuevo Dynamo Script para calcular en unos segundos de forma automática los indicadores de desempeño del uso de encofrados (KPIs). La figura 6.2 detalla los resultados de los indicadores de desempeño “Costo Unitario” (CU), “Factor de Reuso” (FR), y “Factor Eficiencia” (FE). El indicador CU es el único valor que tiene una unidad de medida “USD\$/m²”, pero el resto son indicadores adimensionales. Para el modelo de 5 pisos se concluye que:

- “Cada metro cuadrado de los elementos de concreto armado a encofrar tiene un costo promedio de 11.60 dólares”.
- “Cada juego de encofrados horizontal alquilado se va a reutilizar 6.15 veces”.
- “Cada metro cuadrado de encofrado alquilado puede utilizarse 8.40 veces”

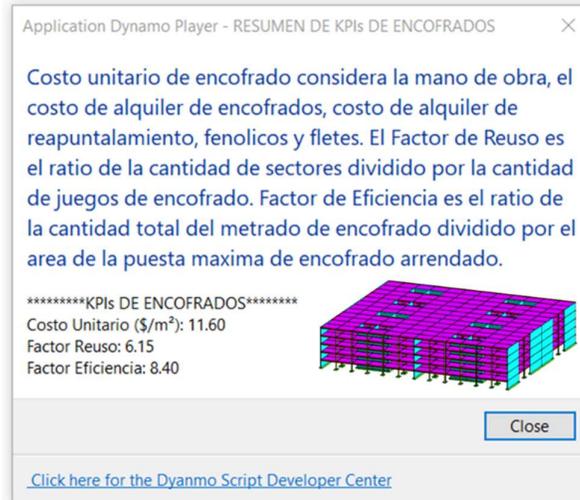


Figura 6.2. Resultados del cálculo automatizado de KPIs para modelo 5 pisos.

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar la figura 6.3 detalla el proceso de evolución del procesamiento del modelo BIM de 20 pisos y 4 sectores por piso. Por la izquierda el modelo sin parámetros, seguido del modelo con los parámetros de tipo de elementos, luego el modelo sectorizado (4 sectores por piso) y finalmente a la derecha el modelo de encofrado con todos sus parámetros calculados.

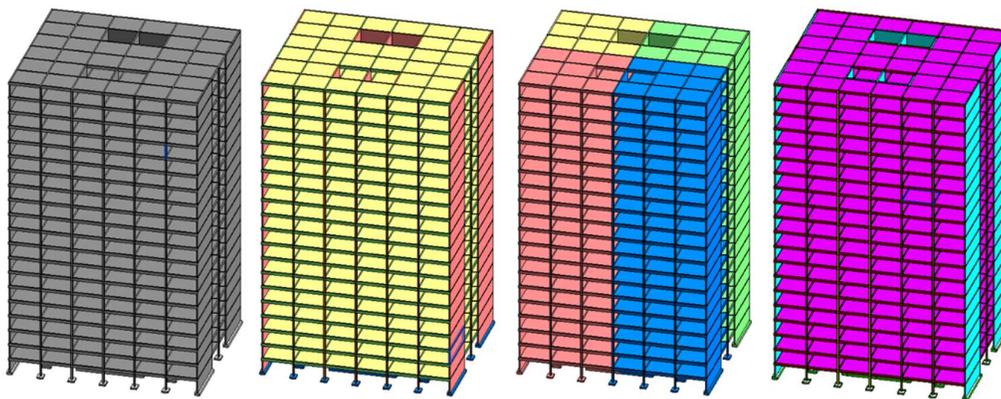


Figura 6.3. Flujo automatizado para modelado de encofrados en modelo de 20 pisos.

Fuente: Elaboración propia.

De forma automática se calcula en unos segundos los indicadores de desempeño del uso de encofrados (KPIs) para el modelo de 20 pisos de altura. La figura 6.4 detalla los resultados de los indicadores de desempeño “Costo Unitario” (CU), “Factor de Reúso” (FR), y “Factor Eficiencia” (FE). El indicador CU es el único valor que tiene una unidad de medida “USD\$/m²”, pero el resto son indicadores adimensionales. Para el modelo de 20 pisos se concluye que:

- “Cada metro cuadrado de los elementos de concreto armado a encofrar tiene un costo promedio de 11.72 dólares”.
- “Cada juego de encofrados horizontal alquilado se va a reutilizar 6.15 veces”.
- “Cada metro cuadrado de encofrado alquilado puede utilizarse 8.61 veces”.

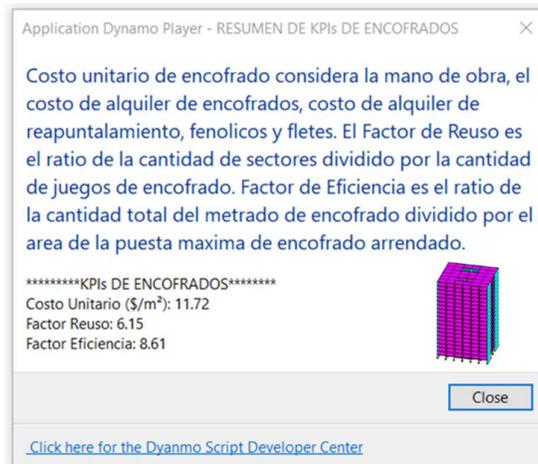


Figura 6.4. Resultados del cálculo automatizado de KPIs para modelo 20 pisos.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de revisado los valores obtenidos en ambos modelos se ha confirmado la hipótesis de que los indicadores de desempeño son iguales o muy similares. En el caso del CU el valor para el modelo de 20 pisos es ligeramente mayor al del modelo de 5 pisos debido principalmente a dos razones. Primero que, por ser un edificio de mayor altura y un ciclo de construcción vertical mayor, necesita una cantidad mayor de pisos reapuntalados para redistribuir las cargas del último piso entre más número de pisos abajo. La segunda razón es que el costo de los encofrados de las cimentaciones es menor a la del resto de elementos y como el metrado de cimentaciones es menor en el edificio de 20 pisos por tener una huella de cimentación menor entonces el costo ponderado del edificio de 20 pisos es mayor al del edificio de 5 pisos. Respecto al FR en ambos modelos el valor de ambos modelos es exactamente igual. El FE del modelo de 20 pisos es ligeramente mayor al del modelo de 5 pisos. Esta ligera diferencia se debe a que el edificio de 20 pisos tiene un metrado ligeramente mayor de la puesta máxima de encofrado de placas debido a tener una mayor área en la fachada. Este ligero incremento en el metrado de la puesta máxima de encofrado de verticales genera que el FE sea ligeramente mayor.

El tercer sujeto de estudio fue el proyecto NEO 10, en el cual se utilizó el modelo de evaluación de proveedores de encofrado utilizando el “Proceso de Análisis Jerárquico” (AHP). En este caso el modelo de evaluación se configuró para el caso de estudio con valores de ponderación del 27.6% para el criterio Z_1 de “Costo de Alquiler”, 47.8% para el criterio Z_2 de “Productividad”, 6.4% para el criterio Z_3 de uso y dependencia de la “Grúa”, y 18.2% para el criterio Z_4 de “Acabado” de la superficie de los elementos de concreto armado. El cálculo de estos valores de ponderación se detalló en la Tabla 5.18 en la columna “Vector Promedio” y en el Anexo 2. Como resultado de esta configuración de la herramienta se pudo evaluar que los resultados de comparación de las alternativas computaron que la mejor alternativa es la “Alternativa 1” (PERI) en este ejemplo aplicativo con un resultado del 48%, seguido de la “Alternativa 3” (HARSCO) con 26.3%, luego la “Alternativa 2” (ULMA) con 16.5%, y finalmente la “Alternativa 4” (EFCO) con 9.2%.

En la figura 6.5 se resume los resultados del análisis de sensibilidad utilizando los 4 criterios de ponderación. De esta imagen se rescata que con la ponderación anterior se obtiene como mejor opción a PERI, pero de considerarse que el 90% de importancia esta dado a cada uno de los criterios anteriores, estos afectan la decisión dependiendo que tan importante sea el criterio para el evaluador. Por ejemplos si el 90% de la importancia se le da al costo de “Alquiler” la mejor opción es HARSCO, pero si la mayor ponderación es asignada al costo asociado a la “Grúa” entonces la mejor alternativa es EFCO. La ventaja de un análisis de sensibilidad es que en una sola grafica se analizan múltiples escenarios y también determinar qué tan sensible es el modelo a los criterios que se han asignado. En el Anexo 5 se adjuntó los resultados del análisis de sensibilidad con mucho mayor detalle para cada uno de los escenarios planteados.

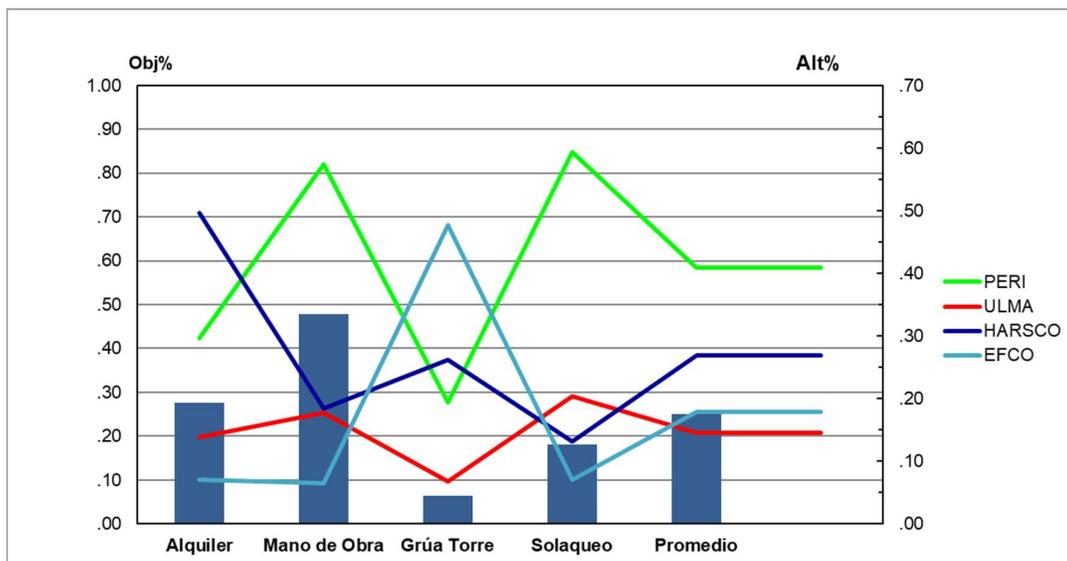


Figura 6.5. Análisis de Sensibilidad evaluación encofrados NEO 10.

Fuente: Elaboración propia.



CONCLUSIONES

El primer objetivo de la tesis era formular un modelo de decisión multi alternativa para mejorar el deficiente proceso de evaluación de proveedores de encofrados durante la etapa de planeamiento, este objetivo ha sido completamente satisfecho con el diseño del modelo basado en el método AHP y estableciendo como criterios de evaluación el costo de alquiler del encofrado (cotización del proveedor), la productividad de la mano de obra, la productividad y dependencia de la torre grúa, y la influencia del encofrado en el acabado de la superficie desencofrado de los elementos de concreto.

De los resultados obtenidos de implementar el modelo de evaluación de proveedores de encofrados utilizando el modelo basado en el método AHP, se concluye que el modelo propuesto permite ampliar los criterios de evaluación de propuestas basándose no únicamente el valor del costo de cada una de las cotizaciones. Si bien la ponderación propuesta esta aplicada un sujeto de estudio, el modelo es adecuado según las características de cada uno de los proyectos en análisis. Esto permitirá mejorar la forma en la que se realiza en la actualidad la toma de decisiones relacionados al alquiler de encofrado basándose únicamente en los precios de las cotizaciones.

El segundo objetivo de la tesis era analizar el modelo basado en tecnologías BIM y las métricas Lean para mejorar la confiabilidad de las estimaciones relacionadas al encofrado durante la etapa de planeamiento, este objetivo también ha quedado satisfecho con el diseño de las herramientas de automatización en Dynamo para Revit. Con un conjunto de Dynamo Scripts se ha logrado automatizar la generación de parámetros, calcular los valores de estos, modelar el encofrado genérico LOD 200 y finalmente estimar los costos e indicadores de desempeño de forma automática. Los valores se contrastaron con dos modelos y los resultados fueron precisos asegurando la confiabilidad de estos procesos que en el pasado eran realizado de forma manual.

El uso del modelo basado en automatización BIM permitió eliminar la posibilidad de error humano para cuantificar áreas de encofrado aumentando la confiabilidad de las estimaciones de cantidades de encofrado requerido, así como de las estimaciones de costos de alquiler de encofrados por solución. El uso de las métricas Lean han permitido generar un modelo que permite sectorizar edificaciones optimizando el tamaño de la cuadrilla y por tanto reduciendo la cantidad de horas hombre no productivas, a la vez que aumentando la confiabilidad del trabajo haciendo que el trabajo este bien balanceado.

El tercer objetivo era formular indicadores de desempeño que permitan mejorar el bajo rendimiento de los encofrados desde la etapa de planeamiento, este objetivo se ha logrado parcialmente. Este objetivo no pudo validarse en su totalidad porque si bien se obtuvieron los indicadores de desempeño y su estimación fue automática y precisa, no se pudo validar como el uso de estos indicadores finalmente mejoran el rendimiento de la rotación de encofrados. Los indicadores son una herramienta para hacer seguimiento del desempeño, pero deben complementarse con medidas de control que permitan tomar acciones correctivas en caso de un bajo rendimiento. Esta implementación de medidas de control



ha quedado fuera del alcance de la presente tesis por lo que es un punto pendiente para abordar como una investigación futura.

El uso de los indicadores de desempeño permite tener una clara interpretación del desempeño del encofrado. El uso del modelo automatizado con BIM permite generar múltiples escenarios de forma automática, sin la necesidad de invertir recursos y tiempo extra para evaluar diferentes alternativas. Los KPIs permitirán también servir de referencia para tomar decisiones basándose en información y no únicamente en la experiencia del constructor.

Respecto a la primera hipótesis, se ha validado que la hipótesis fue positiva ya que el modelo de decisión multi alternativa mejoró la evaluación de proveedores de encofrados. La mejora se evidencia ya que la selección no se ha basado únicamente en un solo criterio como es el costo. Si la decisión se hubiera basado únicamente en el costo la mejor alternativa hubiera sido la “Alternativa 3” (HARSCO), sin embargo, como se han tomado en cuenta otros criterios ponderados en base a una ponderación costos de las partidas del proyecto Neo 10 (Tabla 5.18 columna “Vector Promedio”), la selección de la “Alternativa 1” (PERI) fue la seleccionada. Esto valida que la selección basada en multi criterio ha mejorado la evaluación de proveedores de encofrados.

Respecto a la segunda hipótesis, se ha validado que fue positiva ya que el modelo basado en automatización BIM ha mejorado la confiabilidad de las estimaciones, logrando que los valores de encofrados sean calculados con precisión y sin posibilidad de error humano. Así mismo al tener acceso a base de datos editables según la necesidad de cada proyecto se elimina la posibilidad de error de las operaciones matemáticas al ser todo programado sin necesidad de estar digitando valores en una hoja de cálculo.

La tercera hipótesis también ha quedado validada al verificar que los indicadores de desempeño propuestos miden exitosamente una alternativa de planeamiento respecto a la rotación de los encofrados. Estos KPIs permitirán tener más datos al momento de tomar una decisión respecto a que alternativa de planeamiento tendrá el mejor rendimiento en un proyecto. Los indicadores miden la eficiente rotación dejando de lado el factor costo como único indicador de buen desempeño y uso del encofrado.

La octava dimensión BIM relacionada a la Seguridad y Salud puede implementarse en los modelos de encofrados considerando parámetros relacionados a la ergonomía de los trabajadores, como es el caso de limitar las dimensiones y pesos de encofrados transportados de forma manual. Así mismo respecto a la mitigación de desastres naturales como es el caso de los sismos en le Perú es posible también considerar parámetros BIM relacionados a la liberación e inspección de sistemas de encofrados considerando los sistemas de arriostres para prevenir accidentes en el caso de un sismo.



RECOMENDACIONES

El modelo propuesto basado en tecnologías BIM es factible aplicarlo en conjunto con otras tecnologías como el uso de “Identificadores de Radio Frecuencia” o por sus siglas en inglés RFID para controlar los componentes de encofrado. Cada pieza importante de encofrado podría ser etiquetada con un RFID y luego utilizar el modelo para alimentar la etiqueta con información y determinar si el encofrado está localizado en el frente asignado, sector asignado y si se está utilizando en la solución correspondiente o en algún uso diferente. Esto ayudaría a tener un control real de los encofrados y estar informado de que tan bien se están utilizando en el proyecto.

Otra aplicación del modelo BIM que podría implementarse en investigaciones futuras es complementar este modelo con el uso de sensores para medir la madurez del concreto e implementar estos valores en parámetros que permitan determinar los tiempos de desencofrado. Si los sensores se utilizan en forma conjunta con los modelos BIM, estos podrían retroalimentar en tiempo real con información al modelo y luego se podría usar esta información para gestionar los tiempos de desencofrado en tiempo real. Esto permitiría importantes ahorros ya que el tiempo de desencofrado no estaría basado en valores recomendados de estándares o de la experiencia sino de información real que permitiría reutilizar encofrados apenas el concreto alcance la resistencia especificada.

Investigaciones futuras podrían validar la efectividad de los indicadores de desempeño de rotación de los encofrados para mejorar la rotación de los encofrados. Este fue un punto pendiente en la investigación que podría implementarse en investigaciones futuros incrementando el sujeto de estudio a una población más grande de proyectos reales en los que se pueda medir la evolución de los indicadores de desempeño en base a la toma de medidas de control para mejorar los rendimientos del uso de los encofrados.

Otras investigaciones podrían basarse en los conceptos de “diseño generativo” para pasar a acuñar el concepto de “planeamiento generativo”. En este concepto de “planeamiento generativo” se mejora la forma en la que se ejecuta la etapa de planificación por parte de los constructores. El impacto sería directamente a la eficiencia del uso de los encofrados, ya que con una herramienta de automatización BIM se evalúan miles de alternativas de forma económica y eficiente para tomar decisiones de las alternativas de planeamiento que generaran los mejores resultados durante la ejecución. Para el caso del encofrado en específico se podría simular diferentes opciones de sectorización, así como diferentes alternativas de proveedores de encofrados y analizar únicamente los indicadores de desempeño de encofrado en una gráfica de sensibilidad que permita ver que alternativa alcanza los mejores KPIs y seleccionar una solución óptima.

La investigación está enfocada a la evaluación de encofrados, pero metodologías similares se podrían plantear para otros procesos del proceso constructivo de una edificación como por ejemplo la evaluación de proveedores de prefabricados, proveedores de bombeo de concreto, proveedores de acero dimensionado, etc. El sujeto de estudio en este caso estuvo orientado a una edificación, pero también podría extenderse a cualquier obra civil como puentes, y obras de arte.

BIBLIOGRAFÍA

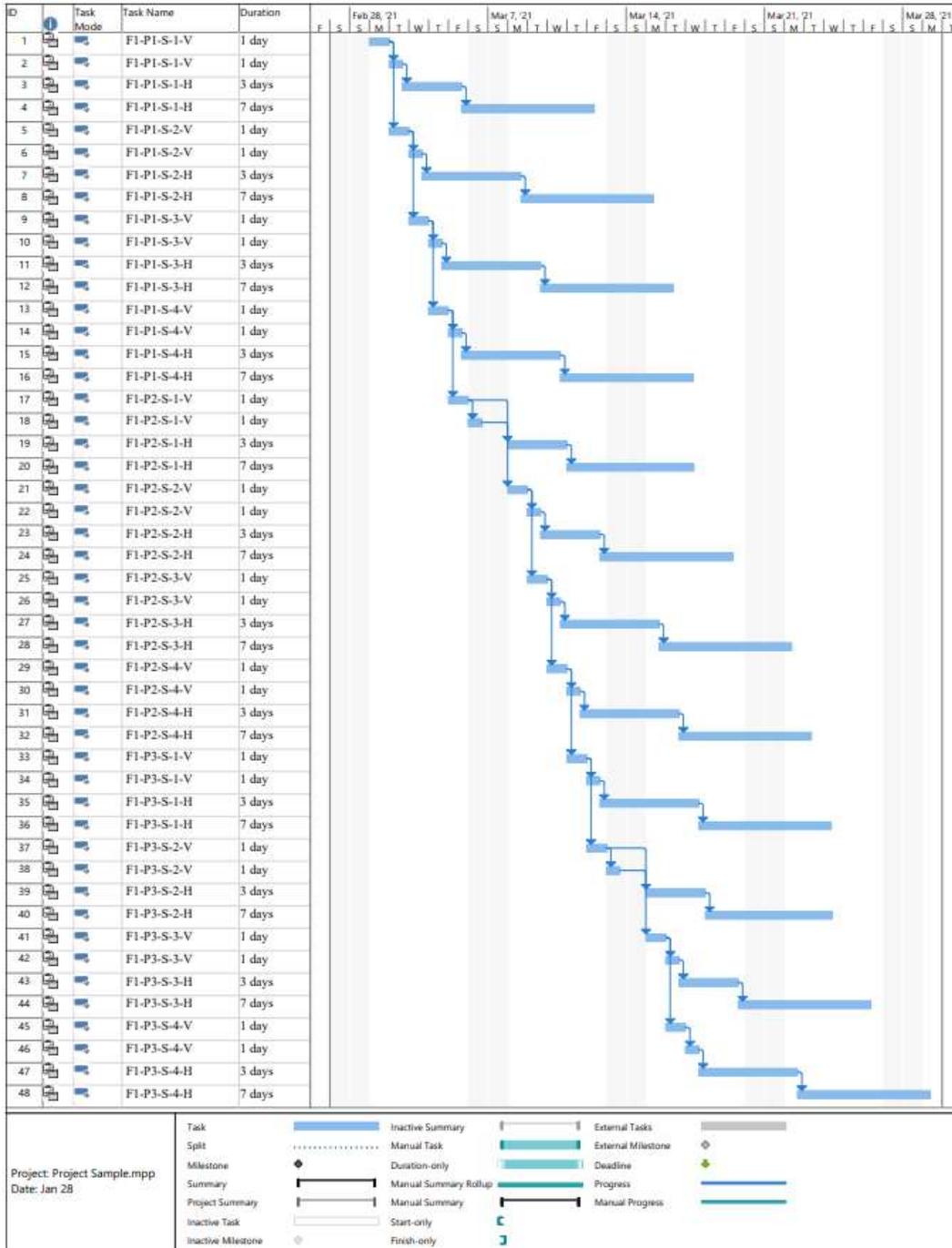
- ACI Committee 347, 2014. *347R-14 Guide to Formwork for Concrete*. s.l.:American Concrete Institute.
- ASCE, 2014. *Design Loads on Structures during Construcion*. ASCE/SEI 37-14 ed. Reston, Virginia, USA: ASCE (SEI).
- BIMForum, 2015. *Level of Development Specification Version 2015*, s.l.: BIMForum.
- Biruk, S. & Jaskowski, P., 2016. Optimization of Vertical Formwork Layout Plans Using Mixed Integer Linear Programming. *International Journal of Civil Engineering*, p. 125–133.
- Blanco, A., 2010. *Evolución del diseño en concreto armado en el Perú*, Lima, Perú: PUCP.
- Dynamo BIM, 2021. *Forum Statistic*. [En línea] Available at: <https://forum.dynamobim.com/t/forum-statistics/21373>
- Gambatese, J. & Jin, Z., 2019. *BIM for Temporary Structures: Development of a Revit API Plug-in for Concrete Formwork*. Laval, ResearchGate.
- Hamooni, M., Maghrebi, M. & Majr, J., 2020. Extending BIM Interoperability for Real-Time Concrete Formwork Process Monitoring. *MDPI*.
- Huang, R.-y., Chen, J.-J. & Sun, K.-S., 2004. Planning gang formwork operations for building construction using simulations. *Automation in Construction*, pp. 765-779.
- Hyun, C., Jin, C., Shen, Z. & Kim, H., 2018. Automated optimization of formwork design through spatial analysis in building information modeling. *Automation in Construction*, pp. 193-205.
- Jimenez, A., 2020. *Encofrados y Andamios para Obras Civiles y Edificaciones*. Lima, Peru: Costos.
- Johnston, D. W., 2014. *Formwork for Concrete. 8th Edition*. Chelsea, Michigan: American Concrete Institute.
- Khosakitchalart, C., Yabuki, N. & Fukuda, T., 2019. *Automatic Concrete Formwork Quantity Takeoff Using Building Information Modeling*. Bangkok, Thailand, CONVR2019, pp. 21-28.
- Khosakitchalart, C., Yabuki, N. & Fukuda, T., 2019. *Automatic Concrete Formwork Quantity Takeoff Using Building Information Modeling*. Bangkok, Thailand, CONVR2019.
- Kim, K., Cho, Y. & Kim, K., 2018. *BIM-Driven Automated Decision Support System for Safety Planning of Temporary Structures*. s.l., s.n.
- Kim, Y. & Cho, Y., 2015. *BIM-Based Planning of Temporary Structures for Construction Safety*. s.l., s.n.
- Klepeis, N. E. y otros, 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, Volumen 11, p. 231–252.
- Krawczynska-Piechna, A., 2016. An Analysis of the decisive criteria in formwork selection problem. *Archives of Civil Engineering*, pp. 185-196.
- Kuo, J.-D. & Ko, C.-H., 2015. *Making formwork construction lean*. s.l., Taylor & Francis Group, pp. 444 - 458.



- Lee, J., Park, Y.-J., Choi, C.-H. & Han, C.-H., 2017. BIM-assisted labor productivity measurement method for structural formwork. *Automation in Construction*, pp. 121-132.
- Liker, J., 2020. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. 2nd ed. s.l.:McGraw-Hill Professional Publishing.
- Mansuri, D., Chakraborty, D., Elzarka, H. & Deshpande, A., 2017. Building Information Modeling enabled Cascading Formwork Management Tool. *Automation in Construction*, pp. 259-272.
- McGraw Hill Construction, 2014. *SmartMarket Report*, Bedford, MA: McGraw Hill.
- McKinsey&Company, 2017. *Reiventing Construction: A Route to higher productivity*, Philadelphia: McKinsey Global Insitute.
- Mu, E. & Pereyra-Rojas, M., 2017. *Practical Decision Making An Introduction to the Analytic Hierarchy Process (AHP) Using Super Decisions V2*. s.l.:Springer International Publishing.
- Murguía, D., 2018. *Primer estudio de adopcion BIM en Proyectos de Edificacion en Lima y Callao 2017.*, Lima, Peru: Pontificia Universidad Catolica del Peru.
- NFPA, 2011. *High-Rise Building fires*, Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Pellegrino, E., Bottiglieri, M. A., Pieper, L. C. & Touil, D., 2021. *Managing and Visualizing Your BIM Data: Understand the Fundamentals of Computer Science for Data Visualization Using Autodesk Dynamo, Revit, and Microsoft Power BI*. 1st ed. Birmingham: Packt Publishing.
- Peurifoy, R. L. & Oberleder, G. D., 2011. *Formwork for Concrete Structures*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc..
- Romanovskya, R., Mejia, L. S. & Azar, E. R., 2019. *BIM-based Decision Support System for Concrete Formwork Design*. s.l., s.n., pp. 1129-1135.
- Saaty, T. L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Sacks, R., Eastman, C. & Ghang, L., 2018. *BIM handbook*. Hoboken, NJ: Wiley & Sons.
- Singh, M. M., Sawhney, A. & Sharma, V., 2017. Utilising Building Component Data from BIM for Formwork Planning. *Construction Economics and Building*, pp. 20-36.
- Wood , A. & Parker, D. J., 2013. *The Tall Buildings Reference Book*. New York: CRC Press LLC.
- Zhang, S. y otros, 2015. *BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning*. s.l., s.n., pp. 31-45.

ANEXOS

ANEXO 1: CRONOGRAMA MS PROJECT MODELO BIM



ANEXO 2: PRESUPUESTO PROYECTO NEO 10

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio (USD)	Parcial (USD)
01	SOTANO DE ESTACIONAMIENTO				1,555,113.71
01.01	ESTRUCTURAS				1,310,649.84
01.01.03.03	Muros Perimetricos				329,834.83
01.01.03.03.04	Encofrado y desencofrado	m2	2,529.98	9.73	24,616.71
01.01.03.04	Muros interiores				233,187.43
01.01.03.04.02	Encofrado y desencofrado	m2	6,482.90	9.73	63,078.62
01.01.03.05	Columnas				13,863.30
01.01.03.05.02	Encofrado y desencofrado	m2	366.78	9.73	3,568.77
01.01.03.06	Vigas				88,967.09
01.01.03.06.02	Encofrado y desencofrado	m2	2,147.84	9.73	20,898.48
01.01.03.07	Losas Aligeradas prefabricadas tipo Firth, h=0.20m				147,332.28
01.01.03.07.02	Apuntalamiento de Viguetas Prefabricadas	m2	4,130.10	7.41	30,604.04
01.01.03.08	Losa maciza h=0.20				66,170.43
01.01.03.08.02	Encofrado y desencofrado	m2	1,540.63	9.73	14,990.33
01.02	ALBAÑILERIA Y ACABADOS				244,463.87
01.02.01	ALBAÑILERIA				68,097.57
01.02.01.01	TARRAJEOS Y ENLUCIDOS				68,097.57
01.02.01.01.01	Solaqueo Interior de Muros	m2	10,877.88	3.43	37,311.13
01.02.01.01.02	Solaqueo de ductos	m2	398.45	3.66	1,458.33
01.02.01.01.03	Solaqueo en Cielo Raso de losas macizas (inc. fondo de escaleras)	m2	1,875.79	3.11	5,833.71
01.02.01.01.05	Limpieza de rebabas en Cielo Raso de losas aligeradas	m2	4,292.14	1.96	8,412.59

Item	Descripción	Und.	Metrado	Precio (USD)	Parcial (USD)
01	TORRE 1				3,164,043.11
01.01	ESTRUCTURAS				1,642,429.07
01.01.01	Obras de Concreto Armado				1,406,523.48
01.01.01.01	Muros				853,909.49
01.01.01.01.02	Encofrado y desencofrado	m2	26,078.93	9.73	253,747.99
01.01.01.02	Columnas				2,958.09
01.01.01.02.02	Encofrado y desencofrado	m2	89.45	9.73	870.35
01.01.01.03	Losas Aligeradas prefabricadas tipo Firth, h=0.17m				310,986.03
01.01.01.03.02	Apuntalamiento de Viguetas Prefabricadas	m2	7,805.41	7.41	57,838.09
01.01.01.04	Losa Maciza h=0.17m				113,157.85
01.01.01.04.02	Encofrado y desencofrado	m2	2,569.20	9.73	24,998.32
01.01.01.05	Vigas				92,438.29
01.01.01.05.02	Encofrado y desencofrado	m2	2,055.08	9.73	19,995.93
01.02	ALBAÑILERIA Y ACABADOS				1,521,614.04
01.02.01	ALBAÑILERIA				243,898.20
01.02.01.01	TARRAJEOS Y ENLUCIDOS				235,074.18
01.02.01.01.01	INTERIORES				235,074.18
01.02.01.01.01.01	Solaqueo Interior de Muros	m2	16,850.00	3.43	57,795.50
01.02.01.01.01.02	Solaqueo de ductos	m2	1,074.38	3.66	3,932.23
01.02.01.01.01.03	Tarrajeo Cielo Raso	m2	10,370.24	6.67	69,169.50
01.02.01.01.01.05	Solaqueo en Cielo Raso	m2	92.55	3.11	287.83
01.02.01.01.01.06	Preparar superficie para enchape	m2	3,612.99	1.43	5,166.58

Descripción	Und.	Metrado	Precio (USD)	Parcial (USD)
Encofrado y desencofrado	m2	55,796.30	9.23	515,207.63
Enlucidos	m2	49,444.42	3.83	189,367.40
Acarreo vertical con Grúa Torre	mes	10.00	11,442.85	114,428.50



ANEXO 3: ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS PROYECTO NEO 10

NEO 10
ENCOFRADO METALICO

	MUROS	COLUMNAS	PLACAS	LOSAS MACIZAS	LOSAS FIRTH	VIGAS	TOTALES		
	2,529.98	456.23	32,706.08	4,030.20	11,935.51	4,204.76	55,862.76		
Valores unitarios									
PERI	4.10	3.91	2.68	2.24	1.37	12.84			
Ulma	2.13	1.63	1.16	3.19	2.97	23.04			
HARSCO	2.24	2.00	1.45	2.43	1.68	11.64			
EFCO	3.60	4.25	1.58	4.13	3.10	22.23			
Montos totales									
PERI	10,368.35	1,782.14	87,768.10	9,027.50	16,316.25	53,973.72	179,236.06	3.21 US\$/m2	PERI
Ulma	5,381.85	742.36	37,998.26	12,864.34	35,449.00	96,881.72	189,317.53	3.39 US\$/m2	ULMA
HARSCO	5,667.25	912.13	47,571.79	9,781.46	20,063.40	48,941.82	132,937.85	2.38 US\$/m2	HARSCO
EFCO	9,119.21	1,941.16	51,679.66	16,624.93	37,029.85	93,471.41	209,866.21	3.76 US\$/m2	EFCO

TOTALES (incluye metálico, madera y fenólico)

	MUROS	COLUMNAS	PLACAS	LOSAS MACIZAS	LOSAS FIRTH	VIGAS	TOTALES		
	2,529.98	456.23	32,706.08	4,030.20	11,935.51	4,204.76	55,862.76		
Valores unitarios									
PERI	7.90	5.80	2.90	4.33	1.43	15.12			
Ulma	4.68	3.52	1.38	5.53	3.03	23.21			
HARSCO	5.48	3.89	1.67	4.76	1.74	16.29			
EFCO	5.90	6.14	1.79	6.46	3.16	22.40			
Montos totales									
PERI	19,984.21	2,644.05	94,785.24	17,455.36	17,009.10	63,583.60	215,461.56	3.86 US\$/m2	PERI
Ulma	11,845.57	1,604.27	45,015.40	22,284.61	36,141.86	97,606.98	214,498.69	3.84 US\$/m2	ULMA
HARSCO	13,876.21	1,774.04	54,588.93	19,201.73	20,756.26	68,485.35	178,682.52	3.20 US\$/m2	HARSCO
EFCO	14,936.38	2,803.06	58,696.80	26,045.19	37,722.71	94,196.67	234,400.82	4.20 US\$/m2	EFCO

Parída	01.01.01.02.03	Habilitación y Colocacion de Encofrado Metálico						
Rendimiento	m2/DIA	MO. 15.0000	EQ. 15.0000			Costo unitario directo por : m2		5.62
H.H.	1.0667	H.M.						
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Materiales								
0101010013	Peón		hh	0.5000	0.2667	4.35	1.16	
0101010015	Oficial		hh	0.5000	0.2667	4.790	1.28	
0101010011	Operario		hh	1.0000	0.5333	5.420	2.890	
								5.33
Equipos								
100202010512	Herramientas		% mo		5.5000	5.33	0.29	
								0.29

Parída	03.11	Acarreo vertical con Grúa Torre						
Rendimiento	mes/DIA	MO. 0.0390	EQ. 0.0390			Costo unitario directo por : mes		11,442.85
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra								
0101050005	Mecánico		hh	0.5000	102.5641	6.55	671.79	
01020200020004	Operador Grúa		hh	1.0000	205.1282	9.85	2,020.51	
0102040001	Operario		hh	2.0000	410.2564	5.42	2,223.59	
								4,915.89
Equipos								
03060500010005	Grúa Torre		dia	1.1700	30.0000	211.83	6,354.90	
0316050010	Herramientas		% MO		3.5000	4,915.89	172.06	
								6,526.96



Partida	01.02.01.01.01.01 Solaqueo Interior de Muros						
Rendimiento	m2/DIA	MO. 70.0000	EQ. 70.0000	Costo unitario directo por : m2			3.43
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra							
0102040001	Operario	hh	4.0000	0.4571	5.42	2.48	
0102050001	Peón	hh	1.0000	0.1143	4.35	0.50	
							2.98
Materiales							
0207010001	Cal Hidráulica	kg		0.5950	0.21	0.12	
02070200030003	Arena Fina	m3		0.0040	12.50	0.05	
02070300010001	Cemento Tipo I	bls		0.0280	5.08	0.14	
02140100010026	Madera Tornillo	p2		0.0300	1.50	0.05	
							0.36
Equipos							
0314090001	Andamio	dia	1.0000	0.0143	0.32		
0316050010	Herramientas	%MO		3.0000	2.98	0.09	
							0.09

Partida	01.02.01.01.01.02 Solaqueo de ductos						
Rendimiento	m2/DIA	MO. 68.0000	EQ. 68.0000	Costo unitario directo por : m2			3.66
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra							
0102040001	Operario	hh	4.0000	0.4706	5.42	2.55	
0102050001	Peón	hh	1.0000	0.1176	4.35	0.51	
							3.06
Materiales							
0207010001	Cal Hidráulica	kg		0.5950	0.21	0.12	
02070200030003	Arena Fina	m3		0.0040	12.50	0.05	
02070300010001	Cemento Tipo I	bls		0.0320	5.08	0.16	
02140100010026	Madera Tornillo	p2		0.1200	1.50	0.18	
							0.51
Equipos							
0314090001	Andamio	dia	1.0000	0.0147	0.32		
0316050010	Herramientas	%MO		3.0000	3.06	0.09	
							0.09

Partida	01.02.01.01.01.03 Tarrajeo Cielo Raso						
Rendimiento	m2/DIA	MO. 30.0000	EQ. 30.0000	Costo unitario directo por : m2			6.67
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra							
0102040001	Operario	hh	3.0000	0.8000	5.42	4.34	
0102050001	Peón	hh	1.0000	0.2667	4.35	1.16	
							5.50
Materiales							
02070200030003	Arena Fina	m3		0.0220	12.50	0.28	
02070300010001	Cemento Tipo I	bls		0.1300	5.08	0.66	
02140100010026	Madera Tornillo	p2		0.0300	1.50	0.05	
							0.99
Equipos							
0314090001	Andamio	dia	1.0000	0.0333	0.32	0.01	
0316050010	Herramientas	%MO		3.0000	5.50	0.17	
							0.18



Partida 01.02.01.01.04 Trazaje de Fondo de Escaleras							
Rendimiento	m2/DIA	MO. 35.0000	EQ. 35.0000	Costo unitario directo por : m2			6.39
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra							
0102040001	Operario	hh	3.0000	0.6857	5.42	3.72	
0102050001	Peón	hh	1.0000	0.2286	4.35	0.99	
4.71							
Materiales							
02070200030003	Arena Fina	m3		0.0200	12.50	0.25	
02070300010001	Cemento Tipo I	bls		0.2150	5.08	1.09	
02140100010026	Madera Tornillo	p2		0.1280	1.50	0.19	
1.53							
Equipos							
0314090001	Andamio	dia	1.0000	0.0286	0.32	0.01	
0316050010	Herramientas	%MO		3.0000	4.71	0.14	
0.15							

Partida 01.02.01.01.05 Solaqueo en Cielo Raso							
Rendimiento	m2/DIA	MO. 75.0000	EQ. 75.0000	Costo unitario directo por : m2			3.11
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra							
0102040001	Operario	hh	4.0000	0.4267	5.42	2.31	
0102050001	Peón	hh	1.0000	0.1067	4.35	0.46	
2.77							
Materiales							
02070200030003	Arena Fina	m3		0.0044	12.50	0.06	
02070300010001	Cemento Tipo I	bls		0.0290	5.08	0.15	
02140100010026	Madera Tornillo	p2		0.0300	1.50	0.05	
0.26							
Equipos							
0314090001	Andamio	dia	1.0000	0.0133	0.32	0.08	
0316050010	Herramientas	%MO		3.0000	2.77	0.08	
0.08							

Partida 01.02.01.01.07 Forjado en descanso escaleras							
Rendimiento	m2/DIA	MO. 90.0000	EQ. 90.0000	Costo unitario directo por : m2			11.08
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra							
0102040001	Operario	hh	5.0000	0.4444	5.42	2.41	
0102050001	Peón	hh	7.0000	0.6222	4.35	2.71	
5.12							
Materiales							
02070200030004	Arena Gruesa	m3		0.0650	12.50	0.81	
02070300010001	Cemento Tipo I	bls		0.4000	5.08	2.03	
02140100010026	Madera Tornillo	p2		0.0500	1.50	0.08	
2.92							
Equipos							
0307030004	Mezcladora de Concreto tipo Trompo 30HP	dia	10.0000	0.1111	25.00	2.78	
0316050010	Herramientas	%MO		5.0000	5.12	0.26	
3.04							



Partida	01.02.01.01.01.08 Forjado de pasos y contrapasos en escalera			Costo unitario directo por : m			4.75
Rendimiento	ml/DIA	MO. 180.0000	EQ. 180.0000				
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio USD	Parcial USD	
Mano de Obra							
0102040001	Operario	hh	9.0000	0.4000	5.42	2.17	
0102050001	Peón	hh	9.0000	0.4000	4.35	1.74	
3.91							
Materiales							
02070200030003	Arena Fina	m3		0.0130	12.50	0.16	
02070300010001	Cemento Tipo I	bls		0.0750	5.08	0.38	
02140100010026	Madera Tornillo	p2		0.0250	1.50	0.04	
0.58							
Equipos							
0307030004	Mezcladora de Concreto tipo Trompo 30HP	dia	1.0000	0.0056	25.00	0.14	
0316050010	Herramientas	%MO		3.0000	3.91	0.12	
0.26							

ANEXO 4: HOJAS DE CALCULO DE AHP

RECURSO	UND	CANTIDAD /M2	P.U (USD)	\$/M2
Alquiler	m2	1.00	3.76	3.76
Mano de Obra	hh	1.07	4.99	5.33
Grúa Torre	hm	0.05	38.14	2.05
Solaqueo	m2	0.89	3.83	3.39

Nº	ATRIBUTOS	PERI r _{i1}	ULMA r _{i2}	HARSCO r _{i3}	EFCO r _{i4}
1	Costo Unitario	7	6	8	5
2	Productividad	6	4	4	3
2	Uso de Grúa	7	2	6	9
3	Acabado	1	3	6	8

COSTO UNITARIO (Considerando solo alquiler de encofrados y puntales)

ELEMENTO	METRADO	PERI r _{i1}	ULMA r _{i2}	HARSCO r _{i3}	EFCO r _{i4}
Muros	2,529.98	4.10	2.13	2.24	3.60
Columnas	456.23	3.91	1.63	2.00	4.25
Placas	32,706.08	2.68	1.16	1.45	1.58
Losas macizas	4,030.20	2.24	3.19	2.43	4.13
Losas firth	11,935.51	1.37	2.97	1.68	3.11
Vigas	4,204.76	12.84	23.04	11.64	22.23
Ponderación	55,862.76	3.21	3.39	2.38	3.76
		7	6	8	5

PRODUCTIVIDAD (Rendimientos sugeridos por proveedor para 1 cuadrilla)

ELEMENTO	METRADO	PERI r _{i1}	ULMA r _{i2}	HARSCO r _{i3}	EFCO r _{i4}
Columnas	456.23	55	45	40	40
Placas	32,706.08	55	45	40	40
Losas Macizas	4,030.20	85	65	70	70
Losas Firth	11,935.51	85	65	70	70
Vigas	4,204.76	95	40	70	40
Ponderación	53,332.78	67	51	51	49
		6	4	4	3

USO DE GRÚA (Pesos de los equipos en Kg/m2 de encofrado)

ELEMENTO	METRADO	PERI r ₂₁	ULMA r ₂₂	HARSCO r ₂₃	EFCO r ₂₄
Muro Pantalla	2,529.98	65	100	100	125
Columnas	456.23	107	77	65	45
Placas	32,706.08	55	64	45	35
Losas Macizas	4,030.20	30	54	45	35
Losas Firth	11,935.51	30	54	35	35
Vigas	4,204.76	35	60	50	48
Ponderación	55,862.76	47	63	46	40
		7	2	6	9

ACABADO (Evaluación visual cualitativa de superficie encofrada)

ELEMENTO	METRADO	PERI r ₃₁	ULMA r ₃₂	HARSCO r ₃₃	EFCO r ₃₄
Ponderación		1	3	6	8
		1	3	6	8

JUICIO VERBAL	EQUIVALENCIA
Extremadamente muy importante	9
Entre muy fuertemente y extremadamente muy importante	8
Muy fuertemente más importante	7
Entre fuertemente y muy fuertemente más importante	6
Fuertemente más importante	5
Entre moderadamente y fuertemente más importante	4
Moderadamente más importante	3
Entre igual y moderadamente más importante	2
Igualmente importante	1

II - TABLA DE COMPARACIONES

II.1 - Criterios del nivel 1: Comparaciones respecto al objetivo general

	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄		RECURSO	UND	CANTIDAD /M2	P.U (USD)	\$/M2
Z ₁	1	1/2	4	2	Costo	Alquiler encofrado	m2	1.00	3.76	3.76
Z ₂	2	1	6	3	Productividad	Mano de Obra	hh	1.07	4.99	5.33
Z ₃	1/4	1/6	1	1/4	Grúa	Grúa Torre	hm	0.05	38.14	2.05
Z ₄	1/2	1/3	4	1	Acabado	Solaqueo	m2	0.89	3.83	3.39

III. Determinación de ponderaciones de cada subcriterio

III.1 - Cálculo del vector principal para Nivel 1

	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	
Z ₁	1	1/2	4	2	Costo
Z ₂	2	1	6	3	Productividad
Z ₃	1/4	1/6	1	1/4	Grúa
Z ₄	1/2	1/3	4	1	Acabado
Suma	3.750	2.000	15.000	6.250	

	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
Z ₁	0.267	0.250	0.267	0.320	0.276	1.135	4.115
Z ₂	0.533	0.500	0.400	0.480	0.478	1.960	4.098
Z ₃	0.067	0.083	0.067	0.040	0.064	0.258	4.025
Z ₄	0.133	0.167	0.267	0.160	0.182	0.736	4.050
							4.072

IV - Determinación de Matrices de Comparación por Pares

IV.1 - Respecto al Criterio "Z₁" Costo

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	2	1/2	4
A ₂	1/2	1	1/4	2
A ₃	2	4	1	8
A ₄	1/4	1/2	1/8	1
Suma	3.750	7.500	1.875	15.000

A₁ = \$3.21
 A₂ = \$3.39
 A₃ = \$2.38
 A₄ = \$3.76

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.267	0.267	0.267	0.267	0.267	1.067	4.000
A ₂	0.133	0.133	0.133	0.133	0.133	0.533	4.000
A ₃	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	2.133	4.000
A ₄	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.267	4.000
							4.000

IV.2 - Respecto al Criterio "Z₂" Productividad

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	4	4	8
A ₂	1/4	1	1	4
A ₃	1/4	1	1	3
A ₄	1/8	1/4	1/3	1
Suma	1.625	6.250	6.333	16.000

A₁ = 67 m²/día
 A₂ = 51 m²/día
 A₃ = 51 m²/día
 A₄ = 49 m²/día

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.615	0.640	0.632	0.500	0.597	2.442	4.092
A ₂	0.154	0.160	0.158	0.250	0.180	0.726	4.026
A ₃	0.154	0.160	0.158	0.188	0.165	0.668	4.056
A ₄	0.077	0.040	0.053	0.063	0.058	0.233	4.010
							4.058

IV.3 - Respecto al Criterio "Z₃" Grúa

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	4	1/2	1/4
A ₂	1/4	1	1/4	1/8
A ₃	2	4	1	1/2
A ₄	4	8	2	1
Suma	7.250	17.000	3.750	1.875

A ₁ =	47 kg/m ²
A ₂ =	63 kg/m ²
A ₃ =	46 kg/m ²
A ₄ =	40 kg/m ²

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.138	0.235	0.133	0.133	0.160	0.648	4.049
A ₂	0.034	0.059	0.067	0.067	0.057	0.227	4.010
A ₃	0.276	0.235	0.267	0.267	0.261	1.069	4.093
A ₄	0.552	0.471	0.533	0.533	0.522	2.138	4.093
							4.051

IV.4 - Respecto al Criterio "Z₄" Acabado

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	1	3	6	8
A ₂	1/3	1	2	3
A ₃	1/6	1/2	1	2
A ₄	1/8	1/3	1/2	1
Suma	1.625	4.833	9.500	14.000

A ₁ =	1
A ₂ =	3
A ₃ =	6
A ₄ =	8

	PERI	ULMA	HARSCO	EFCO	Vector Promedio	Vector Total	VT/VP
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₃			
A ₁	0.615	0.621	0.632	0.571	0.610	2.458	4.032
A ₂	0.205	0.207	0.211	0.214	0.209	0.842	4.025
A ₃	0.103	0.103	0.105	0.143	0.114	0.455	4.005
A ₄	0.077	0.069	0.053	0.071	0.067	0.270	4.004
							4.021

V-Comprobación de consistencia de matrices

Índice de consistencia aleatorio										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TM										
CA	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49

Tamaño de matriz	Ratio de consistencia
3	5%
4	9%
5 ó mayor	10%

$$\lambda_{MAX} = \text{Promedio VT/VP}$$

$$IC = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1}$$

V.1 - Consistencia de Criterios y subcriterios

MZ₁₋₄ λ_{MAX} = 4.072 IC = 0.024 CA = 0.890 RC = 2.7% < 9%

V.2 - Consistencia de Matrices de comparación por pares (MCP)

MCP Z₁ λ_{MAX} = 4.000 IC = 0.000 CA = 0.890 RC = 0.00% < 9%
MCP Z₂ λ_{MAX} = 4.058 IC = 0.029 CA = 0.890 RC = 3.26% < 9%
MCP Z₃ λ_{MAX} = 4.051 IC = 0.025 CA = 0.890 RC = 2.85% < 9%
MCP Z₄ λ_{MAX} = 4.021 IC = 0.010 CA = 0.890 RC = 1.16% < 9%

VI- Cálculo de evaluaciones totales de alternativas

Para Criterios Z₁ al Z₄:

	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z	AZ . Z
A ₁	0.267	0.597	0.160	0.610	0.276	0.480
A ₂	0.133	0.180	0.057	0.209	0.478	0.165
A ₃	0.533	0.165	0.261	0.114	0.064	0.263
A ₄	0.067	0.058	0.522	0.067	0.182	0.092

Alternativa 1:(A1) PERI **0.480**
Alternativa 2:(A2) ULMA **0.165**
Alternativa 3:(A3) HARSCO **0.263**
Alternativa 4:(A4) EFCO **0.092**

MATRIZ DE DECISIÓN

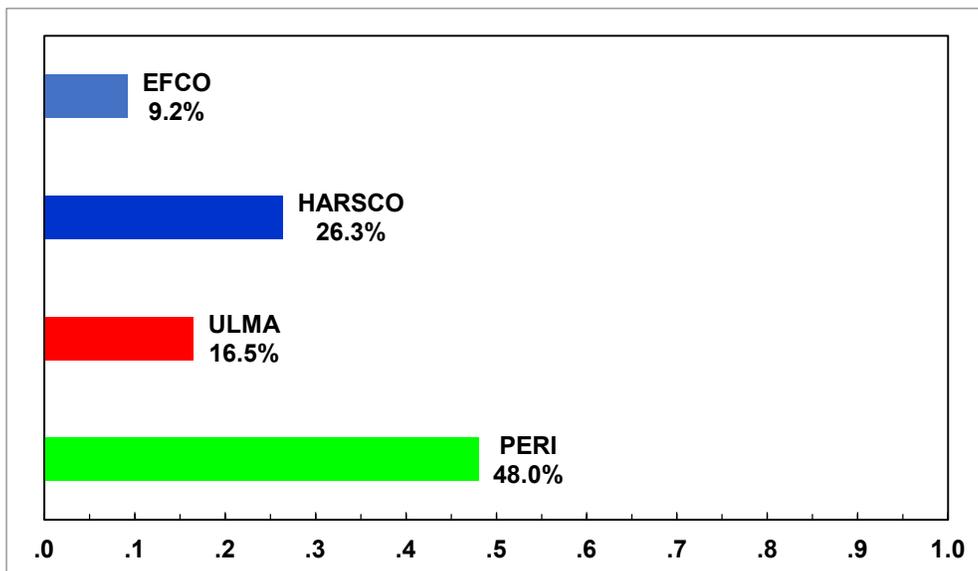
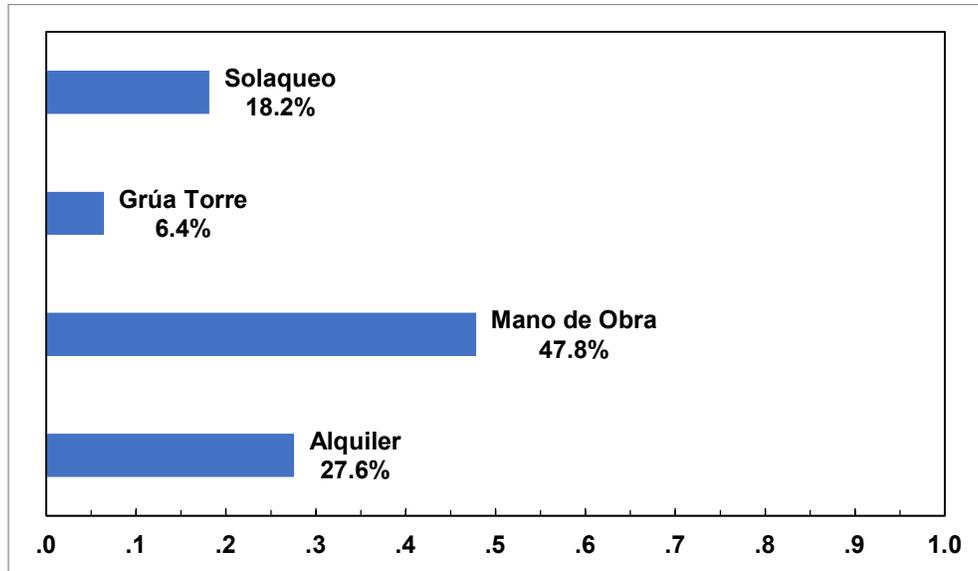
	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
A ₁	0.267	0.597	0.160	0.610
A ₂	0.133	0.180	0.057	0.209
A ₃	0.533	0.165	0.261	0.114
A ₄	0.067	0.058	0.522	0.067

	Z _{selección}	Z ₁ Max	Z ₂ Max	Z ₃ Max	Z ₄ Max	Z _{overall}
Alquiler	0.276	0.900	0.053	0.029	0.034	0.250
Mano de Obra	0.478	0.066	0.900	0.051	0.058	0.250
Grúa Torre	0.064	0.009	0.012	0.900	0.008	0.250
Solaqueo	0.182	0.025	0.035	0.019	0.900	0.250

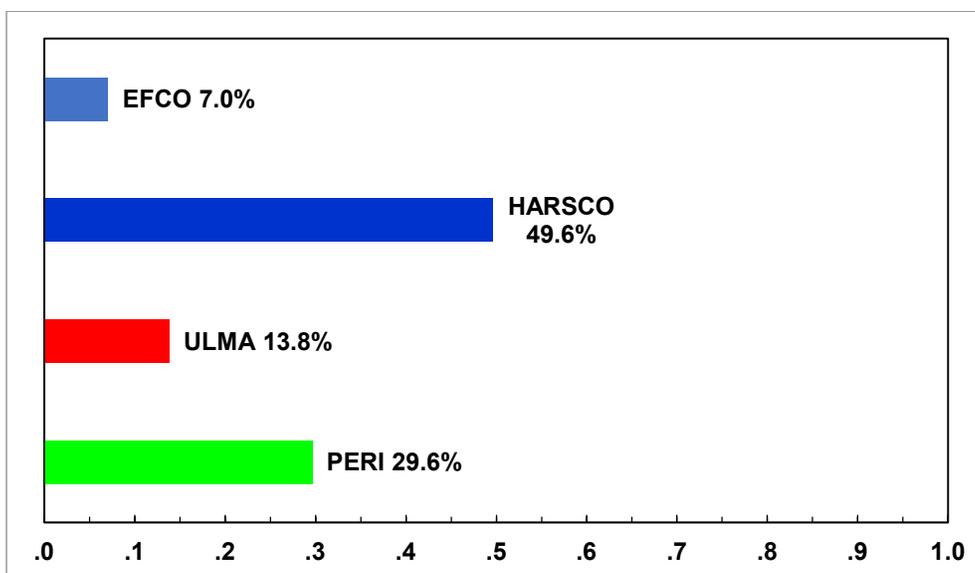
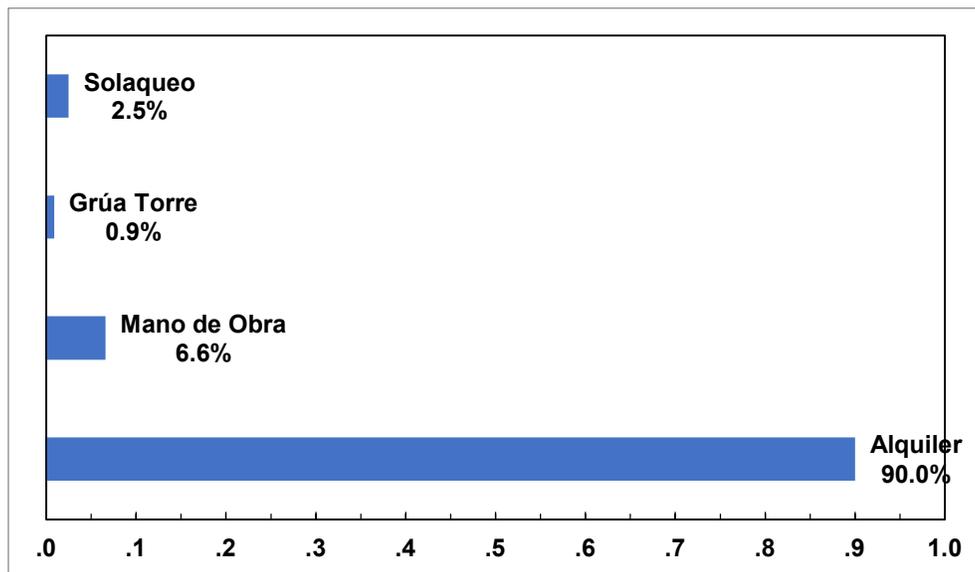
	AZ . Z _S	AZ . Z ₁ Max	AZ . Z ₂ Max	AZ . Z ₃ Max	AZ . Z ₄ Max	AZ . Z _{overall}
PERI	0.480	0.296	0.574	0.194	0.594	0.408
ULMA	0.165	0.138	0.177	0.068	0.204	0.145
HARSCO	0.263	0.496	0.184	0.261	0.132	0.268
EFCO	0.092	0.070	0.065	0.476	0.070	0.179

ANEXO 5: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AHP

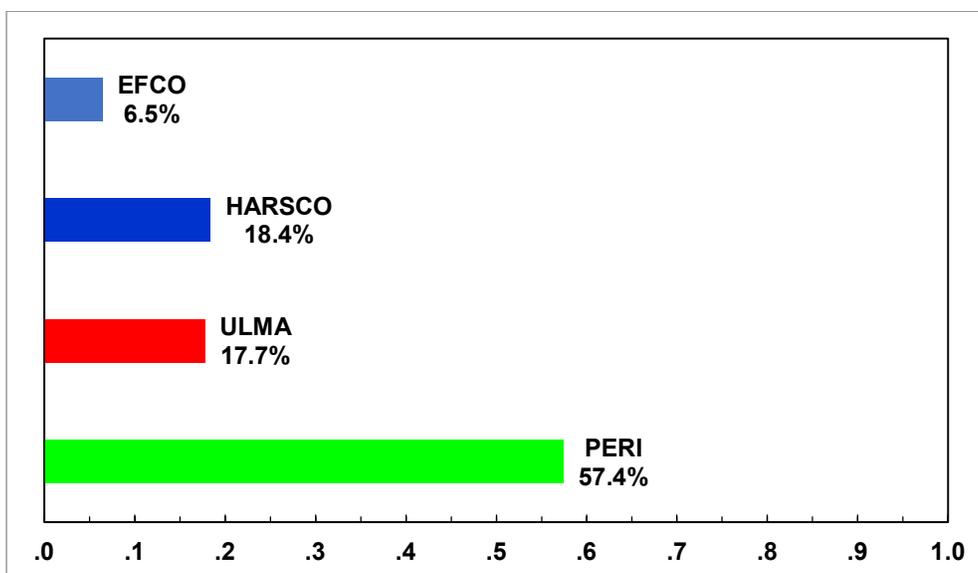
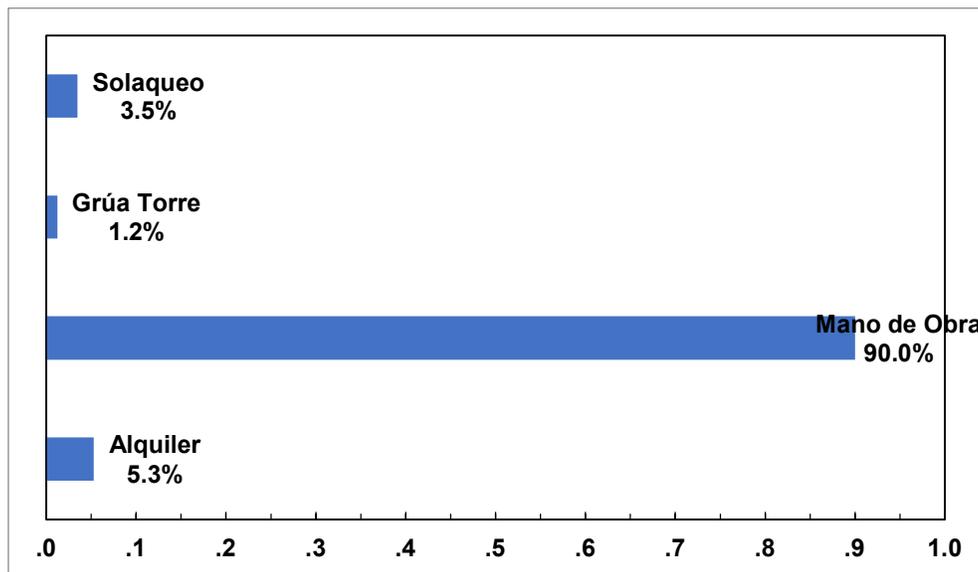
ESCENARIO (MODELO PPTO NEO 10)



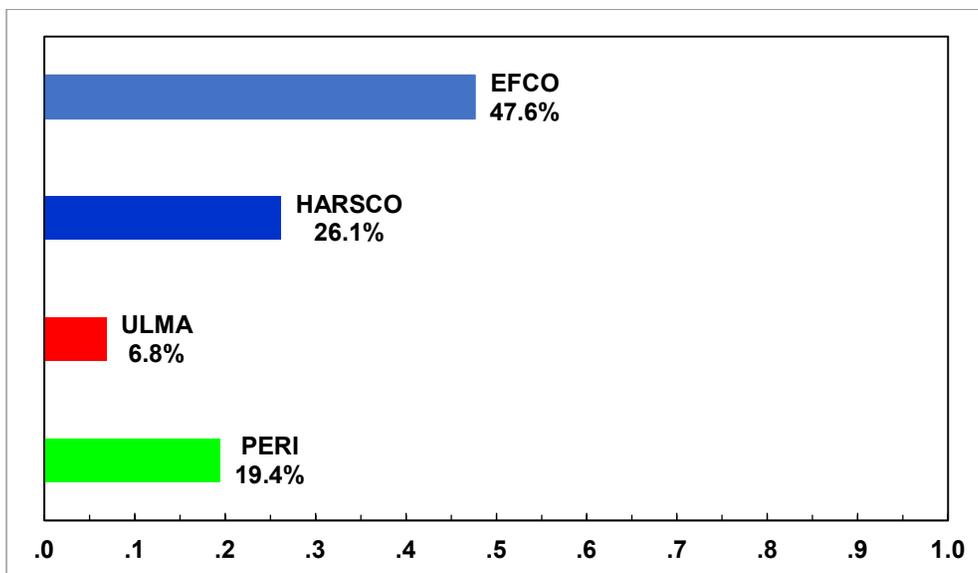
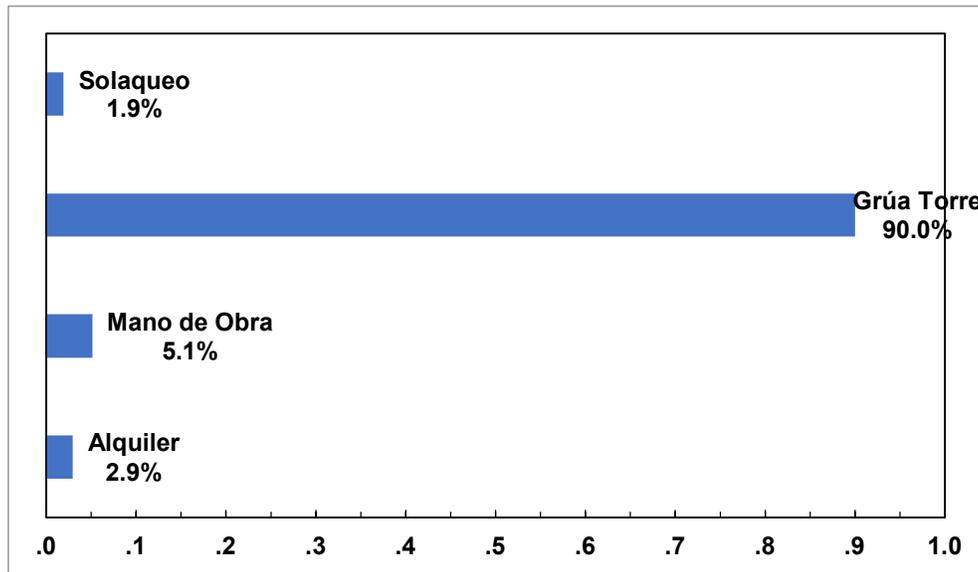
ESCENARIO (ALQUILER 90%)



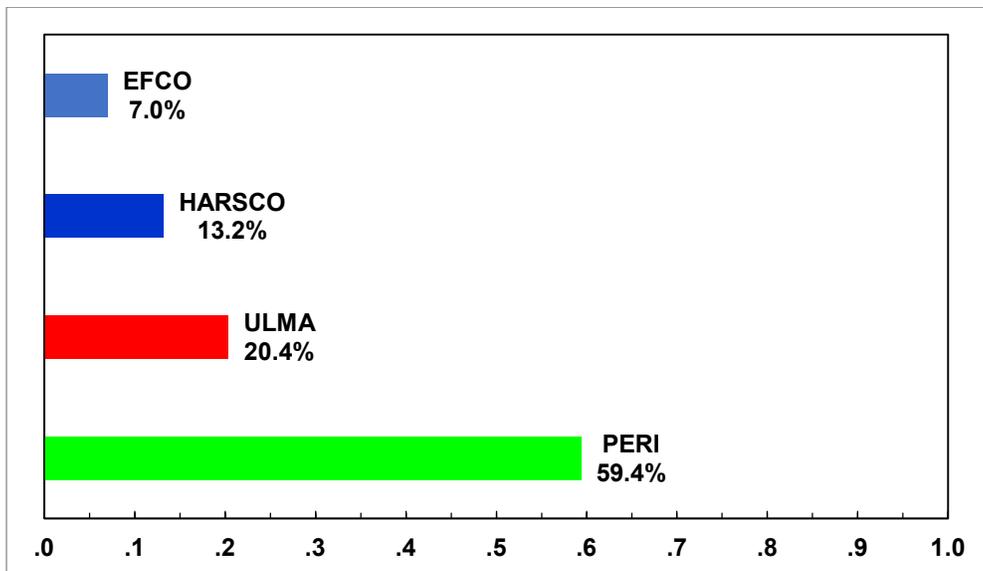
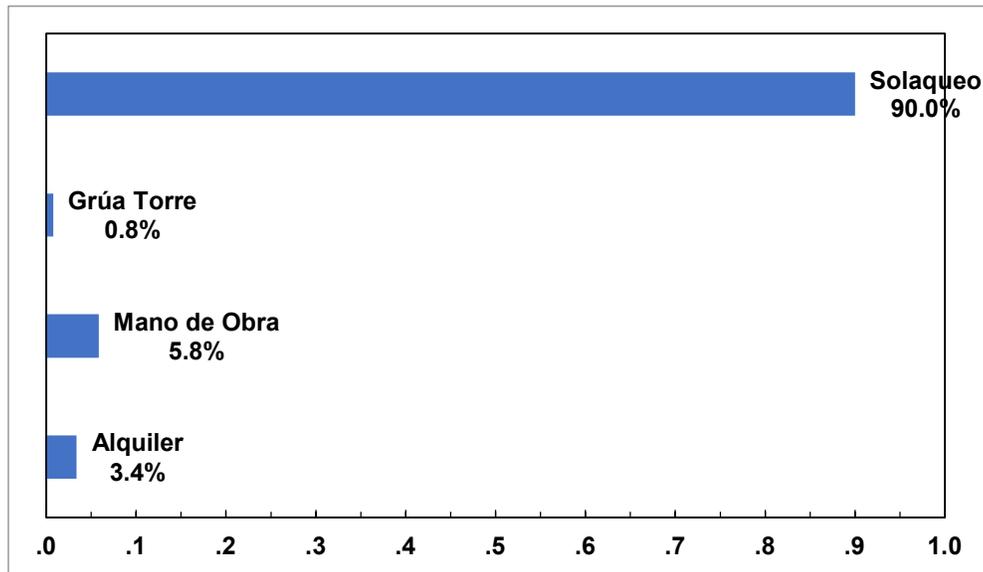
ESCENARIO (MANO DE OBRA 90%)



ESCENARIO (GRÚA 90%)



ESCENARIO (SOLAQUEO 90%)



ESCENARIO (TODOS IGUALES 25%)

