

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**“Programación de fase en proyectos repetitivos y no-repetitivos
mediante líneas de flujo y modelos BIM”**

Tesis para obtener el Título de **Ingeniero Civil** que presentan los bachilleres:

Alonso Urbina Sánchez

Dilmer Rodrigo Dueñas Salazar

Asesor: Danny Murguía Sánchez



Dedicatoria

A mis padres y abuelas, cuya confianza es inigualable. Agradezco haberme mostrado el camino correcto, siempre otorgado la libertad de decidir de acuerdo a mis convicciones y obligado a perseguir mis sueños.

Alonso Urbina

A mi familia por su acompañamiento pleno, apoyo incondicional, amor y paciencia ante cada reto y decisión míos que adoptaron como propios.

Dilmer Dueñas



Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo constante e incondicional de quien consideramos nuestro amigo y mentor y quien, en esta oportunidad, ha sido nuestro asesor, **PhD. (C) Danny Murguía.**

Asimismo, queremos agradecer al **Prof. Olli Seppänen** por haber colaborado con la investigación brindándonos su amplio conocimiento y pericia en Operations Management in Construction. De igual manera al **PhD. Hylton Olivieri** por haber contribuido con sus ideas y experiencia.

También mencionar a la **Maestría en Ingeniería Civil** por habernos provisto de los softwares Tekla Structures 21.1 y Vico Office R 5.3 para uso educacional.

Finalmente, a las empresas colaboradoras **MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C** e **INGECO S.A.C** por habernos brindados toda la información necesaria de sus proyectos, motivos de los casos de estudio.

RESUMEN

En la industria de la construcción, la búsqueda de mejoras de procesos en las distintas áreas de los proyectos se ha agudizado debido a la creciente complejidad y eficiencia que demandan las obras constructivas y a los cada vez más exigentes requerimientos del cliente. Una de las áreas predominantes es la gestión del tiempo, la cual, a lo largo del último siglo, se ha visto desarrollada marcadamente por métodos de gestión basados en actividades. Actualmente, reaparece una opción importante a los métodos mencionados: los basados en locaciones, los cuales se basan en la utilización de líneas de flujo y consisten en la partición del proyecto en locaciones tales que la gestión integral se alivie producto de la división y la concentración de esfuerzos en cada locación individual; de esta forma, se avanza el proyecto bajo la ejecución progresiva de locaciones. Este sistema podría aplicarse tanto a proyectos repetitivos como no repetitivos. Los primeros se basan en la repetición de una secuencia de actividades en distintas locaciones del proyecto, lo cual implica una posible repetición en el sistema de planificación en cada una de dichas subdivisiones, lo que, a su vez, simplifica tanto el entendimiento de los pasos a seguir para la ejecución del proyecto como la modificación del mismo. Por otro lado, los proyectos no repetitivos difícilmente presentan secuencias de actividades idénticas en dos locaciones diferentes, sino que, por el contrario, están compuestos por procesos diversos y distribuciones asimétricas que, en múltiples casos, obligan al planificador a realizar una larga y compleja secuencia de actividades a lo largo de todo el periodo de programación del proyecto. Así, para obtener resultados generalizables los métodos basados en locaciones, en el presente trabajo, se programarán dos proyectos (uno repetitivo y otro no repetitivo) mediante la aplicación de líneas de flujo y el uso de los software BIM Revit 2016, Tekla Structures 21.1 y VICO Office y se determinará su impacto diferenciado en la optimización del tiempo y en el análisis del flujo de trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Preguntas de investigación	1
1.2 Objetivos	1
1.2.1 Objetivo general.....	1
1.2.2 Objetivos específicos	1
1.3 Metodología de trabajo	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 La planificación y la programación	3
2.1.1 Definición y diferencias	3
2.1.2 La importancia de la planificación y la programación	4
2.1.3 Origen de la planificación y la programación en la gestión de proyectos de construcción.....	5
2.2 Tipología de métodos de programación en la construcción	6
2.2.1 Métodos basados en actividades	7
2.2.1.1 Definición.....	7
2.2.1.2 Tipos de métodos basados en actividades	7
2.2.1.2.1 Método de Ruta Crítica (CPM)	8
2.2.1.2.2 Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (PERT)	8
2.2.2 Métodos basados en locaciones	9
2.2.2.1 Definición.....	9
2.2.2.2 Breve reseña histórica de los métodos basados en locaciones	9
2.2.2.3 Tipos de métodos basados en locaciones	13
2.2.2.3.1 Método basado en locaciones enfocado en la producción de unidades (Método de líneas de balance).....	13
2.2.2.3.2 Método basado en locaciones enfocado en locaciones (Método de líneas de flujo).....	14
2.2.2.4 Estructura de desglose de locaciones (LBS por sus siglas en inglés)	15
2.3 Proyectos repetitivos y proyectos no repetitivos	16
2.3.1 Proyectos repetitivos.....	16
2.3.2 Proyectos no repetitivos.....	16
2.4 Metodologías y herramientas relacionadas con la programación de proyectos de construcción	17
2.4.1 Virtual Design and Construction (VDC).....	17
2.4.1.1 Building Information Modeling (BIM)	18

2.4.1.1.1 Niveles de Desarrollo BIM (LOD) – Niveles de Madurez	19
2.4.2 Lean Production.....	26
2.4.2.1 Lean Construction.....	27
2.4.2.1.1 Lean Project Delivery System (LPDS).....	29
2.4.2.1.2 Last Planner System (LPS)	33
3. ESTUDIO DE CASO 1	35
3.1 Descripción del proyecto	35
3.1.1 Presentación de la información del proyecto.....	35
3.1.2 Metodología usada para el proyecto	38
3.1.3 Principales dificultades en la planificación	38
3.2 Elaboración de modelo 3D.....	40
3.2.1 Tekla Structures 21.1	40
3.2.1.1 Fases del desarrollo del modelo	40
3.2.1.2 Incompatibilidades percibidas en AutoCAD - Tekla Structures 21.1.....	55
3.2.2 Programación mediante líneas de flujo (VICO Office R5.3).....	66
3.2.2.1 Consideraciones para la generación de líneas de flujo	66
3.2.2.2 Consideraciones del estudio de caso.....	66
3.2.2.3 Líneas de flujo en Vico Office	71
4. ESTUDIO DE CASO 2	81
4.1 Descripción del proyecto	83
4.1.1 Presentación de la información del proyecto.....	83
4.1.2 Detalles de la gestión real de la fase del proyecto	85
4.1.3 Principales dificultades en la planificación	85
4.2 Elaboración del modelo 3D	85
4.2.1 Revit 2016	86
4.2.1.1 Fases del desarrollo del modelo	86
4.2.2 Programación mediante líneas de flujo (VICO Office R5.3).....	93
4.2.2.1 Consideraciones para la generación de líneas de flujo	93
4.2.2.2 Consideraciones del estudio de caso.....	93
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98
6. CONCLUSIONES.....	100
7. BIBLIOGRAFÍA.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Niveles típicos de costo y dotación de personal en una estructura genérica del ciclo de vida del proyecto (Extraído de Project Management Institute, 2013).....	4
Figura 2: Tipología de métodos de programación en la construcción (Adaptado de Kenley & Seppänen, 2009b)	6
Figura 3: Armonograma de Adamiiecki (Marsh, 1975).....	10
Figura 4: Detalle de las tiras de papel del armonograma de Adamiiecki (Marsh, 1975).....	11
Figura 5: Armonograma completo y lleno (Marsh, 1975).....	12
Figura 6: Armonograma de Adamiiecki que muestra locaciones (Adamiiecki, 1909)	12
Figura 7: Líneas de balance para una actividad (Kenly & Seppänen, 2009)	14
Figura 8: Líneas de flujo para distintas tareas (Kenly & Seppänen, 2009).....	15
Figura 9: Mapa de desarrollo BIM según madurez (Group, 2011)	20
Figura 10: Campos de relación BIM (Succar, 2009)	21
Figura 11: Relación Push - Pull de sub-campos de acción BIM (Succar, 2009).....	22
Figura 12: Costo de cambios, Diseño actual y Diseño BIM deseado (extraído de Eastman, Liston, Sacks, & Liston, 2008)	23
Figura 13: Etapa 1 del desarrollo BIM (Extraído de Succar, 2009).....	24
Figura 14: Etapa 2 del desarrollo BIM (Succar, 2009).....	25
Figura 15: Etapa 3 del desarrollo BIM (Extraído de Succar, 2009).....	26
Figura 16: Lean Project Delivery System (Ballard, 2000a)	31
Figura 17: Lean Project Delivery System (Ballard, 2008)	32
Figura 18: Ubicación del Complejo Fronterizo Sata Rosa (Adaptado de Google, 2016).....	36
Figura 19: Estructura montada en su totalidad e iniciando pintura (fuente propia).....	37
Figura 20: Inicio del software y selección de configuración (fuente propia).....	41
Figura 21: Interfaz inicial de Tekla Structure 21.0 (fuente propia).....	42
Figura 22: Configuración de grilla de trabajo (fuente propia)	43
Figura 23: Plano 2D importado a Tekla Structures 21.1 (fuente propia).....	44
Figura 24: Trazo del cimiento corrido (fuente propia).....	45
Figura 25: Acero de refuerzo en cimentaciones (fuente propia).....	46
Figura 26: Modelamiento de muros de contención con acero de refuerzo (fuente propia).....	47
Figura 27: Modelado de columnas con acero de refuerzo (fuente propia).....	47
Figura 28: Escaleras a través de componentes en Tekla Structures 21.1 (fuente propia).....	48
Figura 29: Estructuras de concreto concluidas (fuente propia).....	49
Figura 30: Columnas metálicas (fuente propia).....	50
Figura 31: Plataforma en nave industrial y comando “Copiar especial” (fuente propia).....	51
Figura 32: Modelado de elementos de tijeral (fuente propia)	52
Figura 33: Cartelas de unión y soldeo de elementos (fuente propia)	53
Figura 34: Ubicación final de todos los elementos (fuente propia).....	53
Figura 35: Conexiones en sus posiciones finales (fuente propia)	54
Figura 36: Verificación de choques en el modelo (fuente propia)	55
Figura 37: Plano de cimentaciones – 2D AutoCAD (Amarillo = Cimentaciones, Rojo = Columnas y plataforma) (fuente propia).....	56
Figura 38: Plano de columnas y plataforma – 2D AutoCAD (fuente propia)	57
Figura 39: Superposición general (fuente propia)	57
Figura 40: Desfase en posición de columna CM-1 entre planos (fuente propia)	58
Figura 41: Desfase en posición de columna CM-2 entre planos (fuente propia)	59

Figura 42: Escalera de acceso a plataforma reubicada (fuente propia)	60
Figura 43: Desfase en empalme de columna (fuente propia)	61
Figura 44: Linealidad errónea de tijerales en planos 2D (fuente propia)	62
Figura 45: Linealidad errónea de tijerales en planos 2D (fuente propia)	62
Figura 46: Escaleras no ejecutadas in situ (fuente propia)	63
Figura 47: Detalles incompletos de unión empernada (fuente propia)	64
Figura 48: Conexión inadecuada (fuente propia)	65
Figura 49: Cambio de elemento para facilitar empalme (fuente propia)	65
Figura 50: Sectorización de proyecto no repetitivo (Adaptado de planos de empresa MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C.)	67
Figura 51: LBS del proyecto de fase de estructuras de una nave industrial (elaboración propia)	68
Figura 52: Interfaz de Vico Office R5.3 (fuente propia)	72
Figura 53: Activación de modelo 3D en Vico Office (fuente propia)	73
Figura 54: Metrados obtenidos del modelo 3D (fuente propia)	74
Figura 55: Metrados obtenidos del modelo 3D (fuente propia)	75
Figura 56: Elaboración de esquema de presupuesto (fuente propia)	76
Figura 57: Vinculación de metrados a esquema de presupuesto (fuente propia)	77
Figura 58: Generación de tareas a representar en líneas de flujo (fuente propia)	78
Figura 59: Definición de relaciones de precedencia (fuente propia)	79
Figura 60: Obtención de flujo en Vico Office (fuente propia)	79
Figura 61: Generación de información complementaria (fuente propia)	80
Figura 62: Modelo BIM del caso de estudio 1 (fuente propia)	80
Figura 63: Red de actividades y precedencias del caso de estudio 1 (fuente propia)	81
Figura 64: Líneas de flujo de la programación del caso de estudio 1 (fuente propia)	82
Figura 65: Ubicación del Condominio “Ciudad Nueva” (Adaptado de Google, 2017)	83
Figura 66: Vista interior del proyecto culminado (fuente: documentación provista por empresa INGECO S.A.C.)	84
Figura 67: Importación de planos 2D a Revit 2016	86
Figura 68: Definición de niveles	87
Figura 69: Definición de ejes (fuente propia)	87
Figura 70: Modelado de losa de primer nivel (fuente propia)	88
Figura 71: Modelado de muros del proyecto (fuente propia)	89
Figura 72: Edición de muros y colocación de capas de acabado (fuente propia)	89
Figura 73: Pisos laminados, enchapados y zócalos (fuente propia)	90
Figura 74: Modelado de puertas, ventanas y mamparas	91
Figura 75: Modelamiento lavatorios, duchas, sumideros, inodoros, etc.	91
Figura 76: Modelamiento muebles y closets	92
Figura 77: Modelo final del edificio de 5 niveles.	92
Figura 79: Sectorización proyecto Ciudad Nueva (Adaptado de documentación provista por empresa INGECO S.A.C.)	93
Figura 80: LBS del proyecto de fase de acabados de una edificación de vivienda masiva (elaboración propia)	94
Figura 62: Modelo BIM del caso de estudio 2 (fuente propia)	95
Figura 63: Red de actividades y precedencias del caso de estudio 2 (fuente propia)	96
Figura 64: Líneas de flujo de la programación del Caso de estudio 1 (fuente propia)	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Teoría de producción TFV (Koskela, 2000).....	30
Tabla 2: Comparación del LPDS vs el método tradicional (Koskela, Ballard, & Tommelein, 2002)	33
Tabla 3: Elementos por locación (realización propia).....	67
Tabla 4: Lista final de actividades y tareas de proyecto no repetitivo (fuente propia)	69
Tabla 5: Conformación de cuadrillas de trabajo en proyecto no repetitivo (realización propia).....	71
Tabla 6: Lista final de actividades y tareas de proyecto repetitivo (realización propia).	94
Tabla 7: Conformación de cuadrillas de trabajo en proyecto repetitivo (realización propia).....	95



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Preguntas de investigación

- a) ¿La utilización de líneas de flujo y modelos BIM optimiza el tiempo total de realización de un proyecto?
- b) ¿La utilización de líneas de flujo y modelos BIM influye en el análisis del flujo de trabajo del proyecto?
- c) ¿Cuál es la diferencia entre aplicar líneas de flujo a la programación de un proyecto repetitivo y a la de uno no repetitivo?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es programar un proyecto repetitivo y uno no repetitivo mediante líneas de flujo y modelos BIM y determinar su impacto diferenciado en la optimización del tiempo y en el análisis del flujo de trabajo.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Sintetizar y presentar información teórica e histórica relacionada con los sistemas existentes de programación y con metodologías y software BIM.
- b) Determinar las características más relevantes de dos casos de estudio: un proyecto repetitivo y otro no repetitivo y programarlos utilizando líneas de flujo y modelos BIM 4D.
- c) Evaluar y determinar los impactos y las diferencias de la aplicación en ambos casos de estudio con relación a la optimización del tiempo y el análisis del flujo de trabajo.

1.3 Metodología de trabajo

a) Revisión de la literatura: se efectuará la búsqueda bibliográfica en artículos científicos indizados, libros, tesis y entrevistas personales con el propósito de identificar los antecedentes al tema e inductivamente formular las preguntas de investigación.

b) Estudio de caso 1: se simulará una nave industrial compuesta por estructuras metálicas y obras de concreto armado (proyecto no repetitivo). La modelación virtual será con el software Tekla Structures 21.1 y la simulación de las líneas de flujo se realizará en el software VICO Office R5.3. La documentación será proporcionada por la empresa MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C.

c) Estudio de caso 2: se simulará la fase de acabados de una edificación de vivienda masiva (proyecto repetitivo). La modelación virtual será con el software Revit 2016 y la simulación de las líneas de flujo se realizará en el software VICO Office R5.3. La documentación será proporcionada por la empresa INGECO S.A.C.

d) Discusión de resultados: comparación y contraste de los resultados de la simulación de proyectos repetitivos y no repetitivos versus las líneas base entregadas por las empresas. La información analizada será direccionada para responder las preguntas de investigación e inductivamente generar el nuevo entendimiento del método de programación de líneas de flujo en proyectos no repetitivos.

e) Conclusiones y recomendaciones: se presentarán las conclusiones finales y recomendaciones para futuras investigaciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 La planificación y la programación

2.1.1 Definición y diferencias

La planificación de un proyecto es un proceso que implica establecer el alcance total, definir y refinar objetivos, y desarrollar la línea de acción requerida para alcanzar dichos objetivos (Project Management Institute, 2013). En palabras más simples, es el proceso de identificar todas las actividades necesarias para completar un proyecto satisfactoriamente. Por otro lado, la programación es el proceso de determinar el orden secuencial de las actividades planeadas, lo cual se logra asignando duraciones y recursos realistas a cada actividad y determinando las fechas de inicio y fin de las mismas (Oberlender, 2000). Así, es evidente que, durante la programación, se pueden identificar actividades no consideradas en la planificación, por lo que esta tendría que realizarse nuevamente o refinarse. De esta forma, se podría decir que la planificación no solo es un prerequisite para la programación (Oberlender, 2000), sino también que ambos procesos son iterativos e interdependientes entre sí. Esto implica que una mejor metodología de planificación contribuirá a una mejor programación y viceversa.

Los términos definidos en el párrafo anterior son normalmente usados indistintamente uno en lugar del otro. Este hecho se percibe en diversas empresas reconocidas del medio, en las cuáles se llama “Planner” al encargado de las duraciones, dependencias y recursos cuando debería ser llamado “Programador”, tal cual como se le identifica en países vecinos como Chile. Sin embargo, este hecho es común en general (Dave, Hämäläinen, Kemmer, Koskela, & Koskenvesa, 2015), por lo que más allá de tratar de entender cargos, se debería siempre considerar las diferencias en los conceptos.

2.1.2 La importancia de la planificación y la programación

A partir de las definiciones de “planificación” y “programación”, el nivel de especificidad y tiempo dedicado a ambos está directamente relacionado con la eficiencia y el éxito del proyecto (Serrador, 2012). En otras palabras, ejecutar ambos procesos adecuadamente y garantizar una relación de interdependencia fluida y eficiente no solo sería esencial para satisfacer integralmente determinadas necesidades con altos estándares, sino también para reducir la duración total del proyecto y generar ahorros significativos.

Lo descrito en el anterior párrafo se explica, en primer lugar, debido a que dichos procesos influyen en todos los factores determinantes de un proyecto, tales como su integración, su delimitación, el tiempo y el costo total que implica, la calidad de los procesos y entregables, la gestión de los recursos, el manejo de la comunicación entre participantes y la relación con todos los involucrados. Así, junto a la fase de control, generan un impacto directo en todas las áreas del conocimiento del PMBOK (Tian, 2016).

En segundo lugar, la planificación y la programación son trascendentales por sus económicas realizaciones en comparación con la ejecución. Considerando la estructura genérica del ciclo de vida un proyecto (ver Figura 1), los costos y la dotación de personal son bajos en las fases iniciales (entre ellas, la planificación y la programación) y luego alcanzan su pico máximo (durante la ejecución) (Project Management Institute, 2013).

Por lo descrito, un conocimiento variado y teórico-práctico de cómo se debe planificar es muy importante para cualquier gestor y la innovación en este tema es urgente y necesaria.

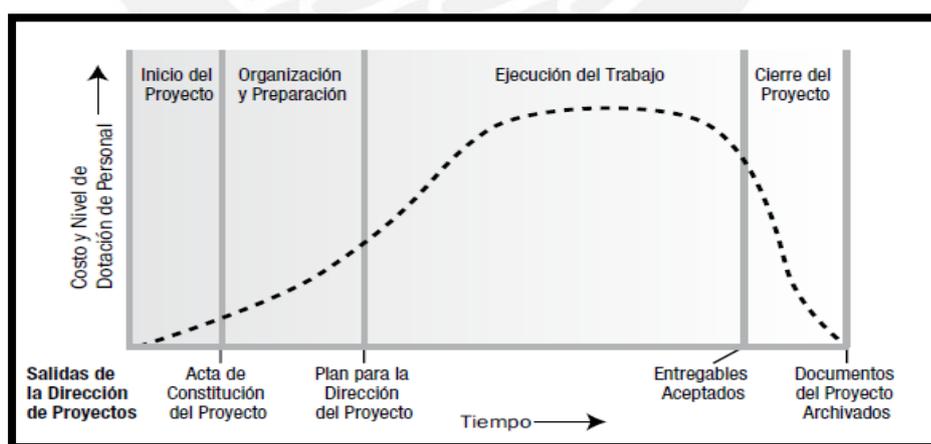


Figura 1: Niveles típicos de costo y dotación de personal en una estructura genérica del ciclo de vida del proyecto (Extraído de Project Management Institute, 2013)

2.1.3 Origen de la planificación y la programación en la gestión de proyectos de construcción

A partir de lo mencionado, se puede inferir que una correcta planificación y programación son muy importantes para el crecimiento integral de la gran diversidad de industrias existentes, entre ellas, la construcción, la cual, a pesar de las múltiples características compartidas con las otras, siempre ha sido un sistema de producción único (Rodríguez, 2013). Esto se remonta a sus longevos orígenes, en los que pequeñas viviendas provisionales eran construidas por nómades y, ya en aquella época, se requería efectividad en temas de alcance, costo y tiempo para garantizar la supervivencia de la especie. Consecuentemente, debido a su complejidad y alta variabilidad, ha sido necesaria, con el pasar de los años, la formulación paulatina de criterios sólidos de gestión de proyectos. Con el crecimiento de las civilizaciones, los primeros documentos de un proyecto civil corresponden al antiguo Egipto y se ha encontrado evidencia arqueológica que muestra que muy probablemente los egipcios fueron los primeros planificadores y programadores en el rubro constructivo (El-Marashly, 1990). Aunque mucho más sencillas y menos especializadas, las técnicas utilizadas por la civilización egipcia ya contaban con registros de recursos laborales y materiales, gestión de abastecimiento de comida y agua para los obreros e incluso con un escriba especializado en la gestión de recursos, el cual actualmente sería llamado Gestor de la Construcción (El-Marashly, 1990). Las grandes obras de la civilización mencionada, tales como las pirámides, que se mantienen en pie hasta nuestros días evidencian que, para conseguir dichos resultados sobresalientes, la planificación fue trascendental, ya que permitió gestionar y construir mega obras en tiempos en los cuales el equipo y los métodos constructivos eran limitados tanto en el ámbito científico como en el técnico.

A pesar de la marcada interdependencia entre la planificación y la programación, el presente trabajo desarrollará el tema de programación en las siguientes secciones debido a los objetivos del estudio.

2.2 Tipología de métodos de programación en la construcción

Dos de los métodos más usados, desarrollados y difundidos a lo largo del último siglo con respecto a la programación son los basados en actividades y los basados en locaciones. Estos se explicarán y detallarán en las siguientes líneas. A continuación, se presenta un gráfico con las principales subdivisiones que se abarcarán en cada caso de acuerdo a Kenley & Seppänen (2009b):

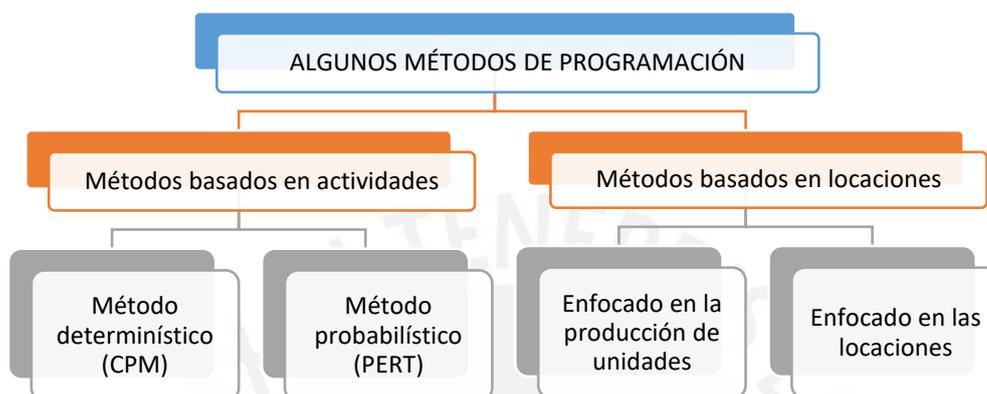


Figura 2: Tipología de métodos de programación en la construcción (Adaptado de Kenley & Seppänen, 2009b)

2.2.1 Métodos basados en actividades

2.2.1.1 Definición

Los métodos basados en actividades son aquellos que se sustentan en un modelado en función de paquetes de trabajo (de acuerdo al PMBOK, un paquete de trabajo es el trabajo definido en el nivel más bajo de la estructura de desglose del trabajo para el cual se puede estimar y gestionar el costo y la duración), las actividades que los constituyen y las relaciones lógicas de precedencia entre dichos paquetes de trabajo o entre las actividades que los componen. Así, las actividades constituyen las unidades de análisis para describir las tareas que se realizarán en el proyecto (Rodríguez, 2013).

A pesar de que estas técnicas han sido las más usadas en los últimos años, presentan también un conjunto de limitaciones que las convierten en herramientas prescindibles si es que se encontrase una con mayores beneficios. Entre los inconvenientes de estos métodos, se encuentra el hecho de que no se considera o se considera vagamente la configuración espacial de los componentes del proyecto, lo cual implica la evasión de un elemento muy importante en las operaciones constructivas y subsecuentes deficientes comunicaciones con involucrados e ineficientes monitoreo y control del proyecto. Asimismo y continuando con la problemática, lo mencionado puede generar que los diferentes involucrados generen diversas interpretaciones de la planificación elaborada, lo cual a su vez conlleva a limitantes en la toma de decisiones y errores en las mismas.

2.2.1.2 Tipos de métodos basados en actividades

Existen una gran variedad de métodos basados en actividades en las diferentes industrias; dos de las más conocidas en la planificación de la construcción son el Método de Ruta Crítica (CPM por las siglas en inglés de Critical Path Method), el cual es determinístico, y la Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (PERT por las siglas en inglés de Program Evaluation and Review Technique), la cual es probabilística. Se explicarán brevemente estas subdivisiones en las siguientes líneas.

2.2.1.2.1 Método de Ruta Crítica (CPM)

El método de ruta crítica es un método utilizado para estimar la mínima duración del proyecto y determinar el nivel de flexibilidad en la programación de los caminos de red lógicos dentro del cronograma (Project Management Institute, 2013). Este método consiste en listar las actividades, asignarles una duración estimada, asignarles dependencias, establecer puntos de inicio y fin lógicos y, así, calcular el camino más largo (duración mínima del proyecto) y las holguras de las actividades no críticas (holgura igual a cero). El origen de este método se remonta al año 1956 y fue desarrollado en un inicio por Kelly, Jr. y Morgan Walker de las empresas Remington Rand y DuPont respectivamente con el objetivo de determinar las utilidades de los recientemente desarrollados ordenadores en la planificación y la programación de proyectos en la industria.

Es muy interesante el hecho de que han pasado más de 50 años desde su aparición formal y aun así no ha habido cambios fundamentales en el método (O'Brien & Plotnick, 2010). Cuando se originó por primera vez, se realizó una programación de un proyecto de construcción y se comparó con una programación del mismo proyecto realizada con métodos tradicionales usados hasta entonces. Los resultados fueron que, ante cambios sustanciales en el proyecto, al utilizar CPM, solo requería un 10% del esfuerzo inicial utilizado en la ejecución de la programación, porcentaje mucho menor comparado con la revisión de la programación realizada con métodos tradicionales. Adicionalmente, con este método se identificaban actividades críticas con mayor rapidez y precisión (O'Brien & Plotnick, 2010). Luego, el método se probó en una operación de acarreo en la empresa Dupont, lo que permitió reducir los tiempos de para en un 40% y garantizó, en un inicio la efectividad de este método, lo cual conllevó a su adopción en otras industrias y a un interés marcado por parte de diversas instituciones para su desarrollo.

2.2.1.2.2 Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (PERT)

La Técnica de Revisión y Evaluación de Programas es una técnica estadística que aplica un promedio ponderado de estimaciones optimistas, pesimistas y más probables en el cálculo de las duraciones de las actividades individuales (Project Management Institute, 2013). Este método se basa en las mismas matemáticas y lógica que el método CPM; sin embargo, tiene un diferente marco estratégico (Kenley & Seppänen, 2010). La diferencia radica en que, en lugar de considerar inicios y fines tempranos y tardíos, el método PERT toma la duración de determinada actividad y calcula la probabilidad que el fin de la actividad ocurra de acuerdo a lo estimado. Este método es comúnmente usado en conjunto con el CPM para maximizar los beneficios de cada uno. Así, generalmente, primero se calcula la ruta crítica mediante el método CPM y, luego, se calcula la probabilidad de que la duración total

obtenida de esta ruta se cumpla; de hecho, el método CPM se mejoró significativamente cuando el programa de misiles Polaris de la marina de guerra de Estados Unidos se interesó en él y desarrollo paralelamente el método PERT. El origen de esta técnica se atribuye generalmente a la Oficina de Proyectos Especiales (SPO), perteneciente al programa Polaris, que determinó en aquel momento que no existían suficientes herramientas que brindaran toda la información necesaria para una evaluación de proyectos efectiva (O'Brien & Plotnick, 2010). Con el pasar de los años, este método ha ido evolucionando y diversificándose; por ejemplo, ahora es usual utilizar simulaciones Monte Carlo, en lugar de los valores pesimista, optimista y más probable para mejorar el cálculo de la probabilidad (Kenley & Seppänen, 2010).

2.2.2 Métodos basados en locaciones

2.2.2.1 Definición

El modelado de los métodos basados en locaciones se sustenta en el seguimiento de tareas específicas en las distintas locaciones predeterminadas (Kenly & Seppänen, 2009). En este caso, se considera a una tarea como un conjunto de actividades similares realizadas en diversas locaciones por una o más cuadrilla. Por ejemplo, mientras una actividad es *Vaciado de concreto de columnas en sótano 1*, una tarea sería *Vaciado de concreto*. De esta manera, el enfoque de estos métodos no es la actividad en sí, sino el flujo de recursos de locación en locación que siguen a la tarea que se realiza.

Estos métodos representan una alternativa prometedora a la problemática relacionada con los métodos basados en actividades, ya que estas técnicas no solo cubren las limitaciones del anterior sistema, sino también se basa en un uso efectivo de recursos y de eliminación de pérdidas, lo cual es una filosofía paralela con metodologías novedosas en el medio de la industria de la construcción como Lean Construction y Building Information Modeling (BIM). Los métodos basados en locaciones cuentan con muchos años de utilización en diversas partes del mundo; sin embargo, con el desarrollo de software, su uso se ha vuelto mucho más sencillo y beneficioso.

2.2.2.2 Breve reseña histórica de los métodos basados en locaciones

El origen de estos métodos se remonta a 1896, año en el cual un pionero de la gestión de proyectos, Karol Adamiecki (1866-1933), desarrolló una teoría de armonización de trabajo centrándose en un análisis principalmente gráfico llamado "armonograma", el cual vendría a ser el primer diagrama de programación y la primera herramienta de red de flujo de trabajo conocidos. Lamentablemente, este padre de la gestión de proyectos no fue debidamente

reconocido debido principalmente a la tardía publicación de su método (1931), únicamente en polaco, y a su poco énfasis en sus beneficios; sin embargo, la aplicación de esta herramienta permitió un incremento en la producción de 100 a 400% en fábricas de las industrias química, mecánica, de agricultura y de minería en las que fue utilizada tanto en Polonia como en otros países (Como se cita en Marsh, 1975). Para conocer en detalle a la herramienta gráfica pionera de la planificación y notar que la variación de la misma no ha sido tan marcada a lo largo de 100 años, se presenta un resumen de las características del armonograma de Adamiecki.

Armonograma de Adamiecki, el primer diagrama de programación

Aunque no se tiene registro de los primeros armonogramas realizados por Adamiecki, a continuación, se describirá brevemente las características del armonograma publicado por él mismo en 1931. Una de las más resaltantes e interesantes particularidades de esta herramienta es que combinó dos ideas que recién aparecerían formalmente en los años 1950: el diagrama de Gantt y las redes de flujo de actividades (Marsh, 1975).

El armonograma mencionado consistió en una tabla, cuyo eje vertical indicaba el tiempo, compuesta por tiras de papel removibles puestas en su lugar y fijadas con clips en sus extremos tal como se muestra en la Figura 3.

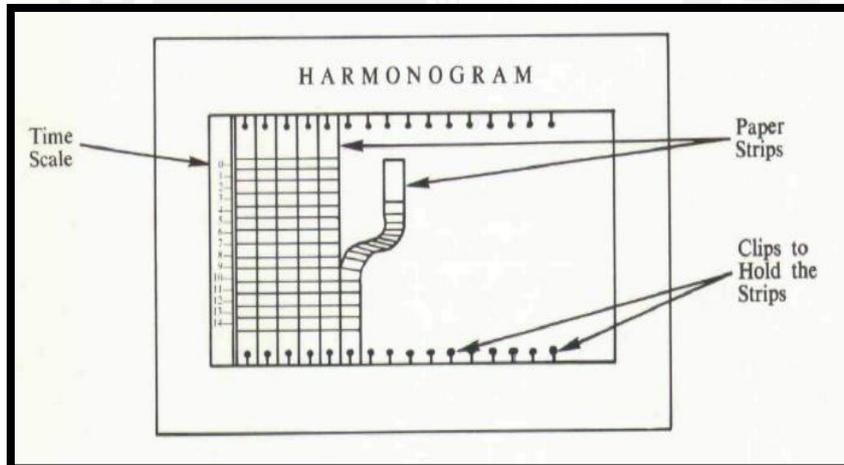


Figura 3: Armonograma de Adamiecki (Marsh, 1975)

Cada tira se colocaba de tal forma que la tira que iba a la derecha debía ser sucesora de la que estaba inmediatamente a la izquierda o respetar esta lógica en caso exista dos o más predecesoras o sucesoras. Además, cada tira contaba con un encabezado que detallaba el código de la tarea, el nombre de la tarea, su tarea antecesora y su tarea sucesora. Debajo del encabezado, en la franja izquierda de cada tira de papel, se colocaba una etiqueta deslizante hecha de una placa metálica fina o de un celuloide de color que abarcaba la

cantidad de espacios de tiempo correspondiente a la duración de la tarea. El detalle de las tiras de papel se presenta en la Figura 4.

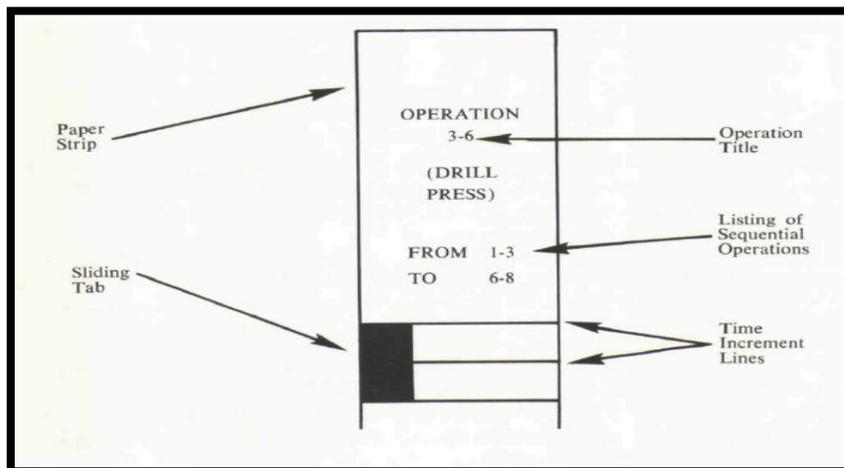


Figura 4: Detalle de las tiras de papel del armonograma de Adamecki (Marsh, 1975)

Así, como se evidencia en las figuras presentadas y en la descripción de la herramienta, la programación se resume a tener listas las tiras de papel correctamente etiquetadas y comenzar a desplazar las etiquetas deslizantes de acuerdo a las duraciones y relaciones de precedencia de las actividades. Cabe resaltar que, debido a que tanto la etiqueta deslizante como las tiras de papel son móviles, el cronograma puede ser actualizado sin mayor esfuerzo y, una vez terminada la programación, se puede identificar sencillamente la ruta crítica, la duración total del proyecto y las holguras de las actividades no críticas.

Finalmente, con respecto al monitoreo y control del proyecto, en las franjas en blanco de la derecha de cada tira de papel se puede colocar mediante líneas inclinadas el inicio de la actividad, el progreso de la misma, su porcentaje de cumplimiento, si hubo demoras, si dos cuadrillas se encuentran trabajando al mismo tiempo y/o en el mismo lugar y otros datos variados y trascendentales para un efectivo seguimiento de un proyecto. Como se verá en las siguientes secciones, la herramienta propiamente dicha no ha cambiado mucho en más de 100 años. Para una referencia gráfica de la explicación, se muestra un armonograma completo y lleno en la Figura 5

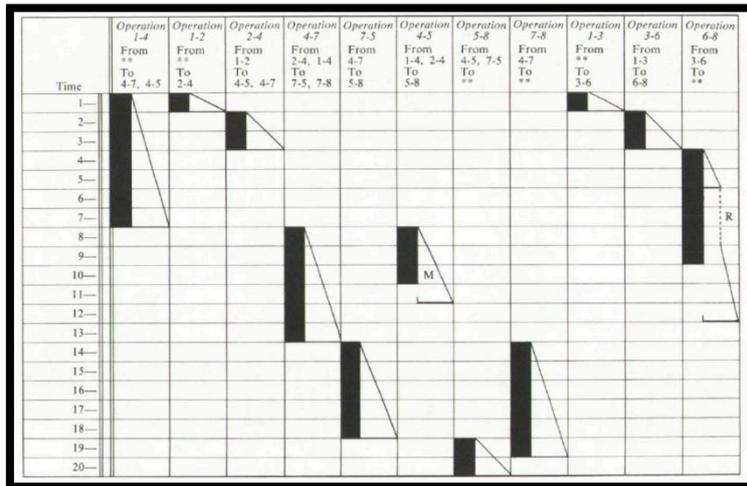


Figura 5: Armonograma completo y lleno (Marsh, 1975)

Adicionalmente al armonograma mostrado en la figura anterior, Adamiiecki desarrolló otros. Uno de ellos se mostrará a continuación y, en este caso, coloca las locaciones de la manufactura de un determinado producto en el eje “y”, coloca el tiempo en el eje “x”, representa las tareas mediante barras, presenta flujos entre locaciones con líneas, muestra diferentes rendimientos mediante líneas no necesariamente paralelas y muestra discontinuidades en las líneas de producción.

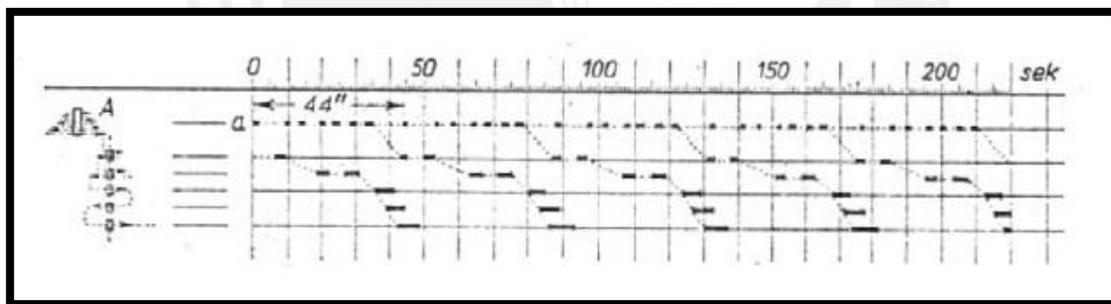


Figura 6: Armonograma de Adamiiecki que muestra locaciones (Adamiiecki, 1909)

A pesar de que en el primer diagrama mostrado (Figura 5) no se observen claramente las locaciones en uno de los ejes y que, en el segundo diagrama mostrado (Figura 6), no se muestren las tareas como líneas, se considera a Adamiiecki el padre de los métodos basados en locaciones, porque fue el primero en preocuparse en representar tanto locaciones, como flujos de trabajo en un cronograma (Kenley & Seppänen, 2010). Esto le permitía, entre otros beneficios, aumentar la eficiencia del proyecto buscando alinear líneas en una época donde recién se estaba pensando el diagrama de Gantt.

Luego de su primera aparición en el invento de Adamiecki, los métodos basados en locaciones se utilizaron en los siguientes hitos históricos remarcables:

- En 1929, se registra el primer uso del método basado en locaciones en un proyecto de construcción importante e innovador: la construcción del edificio Empire State en Nueva York.
- En los años 1940s, la compañía automotriz Goodyear adopta y desarrolla método de locaciones para su producción. De hecho, el mayor uso en la historia que se ha dado de los mencionados métodos es en la industria de la manufactura (Frandsen A. , 2015).
- En los años 1950s, la naval de Estados Unidos expandió su uso.

Cabe resaltar que, a pesar de estos hechos históricos, los beneficios que generó el uso de la herramienta en los proyectos mencionados y el abundante estudio de estos métodos en los años 60 y 70, la herramienta no fue adoptada por la industria de la construcción (Kenly & Seppänen, 2009).

2.2.2.3 Tipos de métodos basados en locaciones

Dentro de los métodos basados en locaciones previamente descritos, se pueden distinguir dos enfoques claros y fundamentales: el enfoque en la producción de unidades y el enfoque en las locaciones propiamente dichas. Se explicarán brevemente estas subdivisiones en las siguientes líneas. Cabe resaltar que existen diversos nombres para los métodos que se describirán a continuación. Sin embargo, muchos de dichos nombres son descriptivos y no engloban a la metodología en sí (Kenly & Seppänen, 2009). Por ello, en las descripciones de los tipos de métodos basados en locaciones se utilizará la clasificación propuesta por Kenly & Seppänen (2010).

2.2.2.3.1 Método basado en locaciones enfocado en la producción de unidades

(Método de líneas de balance)

Esta subdivisión consiste en el desarrollo del método basado en locaciones enfocado en la terminación de la producción continua de un determinado conjunto de unidades repetitivas. De esta forma, la aplicación de este método se acomoda de mejor manera en industrias de manufactura o en proyectos lineales. Así, en esta subdivisión, las tasas de producción por unidad de tiempo son de esencial importancia. Este método usa las líneas de balance como herramientas principales, por lo que también recibe el nombre de Métodos de líneas balance. Estas herramientas consisten en dos líneas inclinadas (una de inicio y otra de fin)

para cada actividad situada en un gráfico con unidades de producción en el eje vertical y tiempo en el eje horizontal. Esta definición se extrajo de Kenley & Seppänen (2010) y de Lumsden (1968), quién fue uno de los primeros autores en utilizar el término. Si bien es cierto existen autores que llaman líneas de balance a las líneas de flujo, que serán descritas a continuación, se vio conveniente colocar esta acotación.

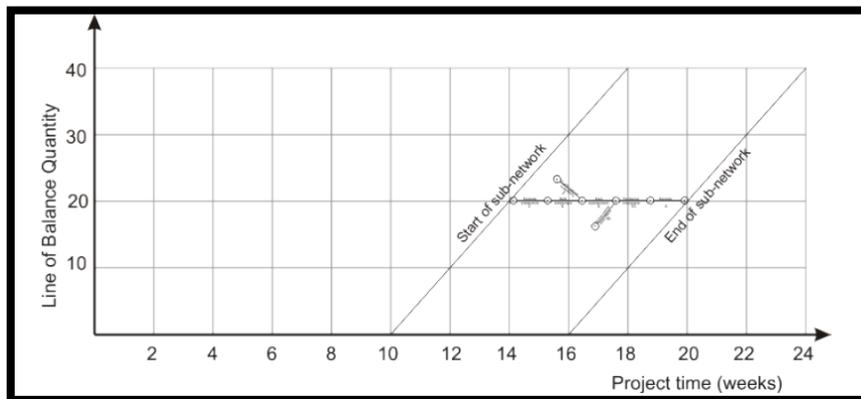


Figura 7: Líneas de balance para una actividad (Kenly & Seppänen, 2009)

2.2.2.3.2 Método basado en locaciones enfocado en locaciones (Método de líneas de flujo)

Esta subdivisión consiste en el desarrollo del método basado en locaciones enfocado en la terminación de locaciones físicas que conforman un determinado proyecto, como se suele dar principalmente en industrias de manufactura o en proyectos lineales. De este modo, en esta subdivisión, la tasa de terminación secuencial es de esencial importancia. Así, la aplicación de este método se acomoda más a edificios comerciales, por ejemplo. Este método usa las líneas de flujo como herramientas principales, por lo que también recibe el nombre de Método de líneas de flujo. Estas herramientas consisten en líneas que representan tareas que a medida que van siendo terminadas en una locación pasan a la siguiente en un gráfico con locaciones en el eje vertical y tiempo en el eje horizontal.

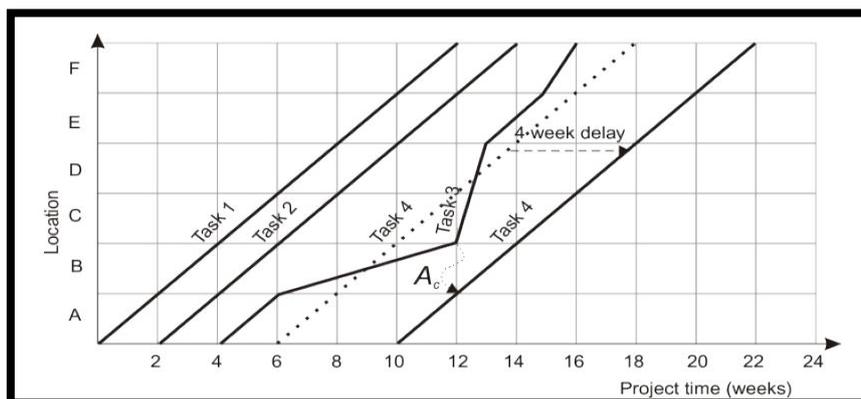


Figura 8: Líneas de flujo para distintas tareas (Kenly & Seppänen, 2009)

2.2.2.4 Estructura de desglose de locaciones (LBS por sus siglas en inglés)

En las secciones anteriores, se definieron los métodos basados en locaciones, pero aún no se mencionó cómo determinar dichos espacios. Estos son definidos al realizar la Estructura de desglose de locaciones. (LBS por sus siglas en inglés). La LBS consiste en una separación jerárquica en partes de los distintos espacios del proyecto, de tal forma que todo nivel alto debe incluir siempre y completamente a todos sus niveles menores (Kenley & Seppänen, 2010). Es muy similar a la Estructura de desglose de trabajo (WBS por sus siglas en inglés), incluso podrían coincidir dependiendo del criterio del gerente de proyecto. La principal diferencia entre ambas es que mientras, en una WBS, el gestor centra la división en el trabajo por hacer, en una LBS, el programador se enfoca en los espacios y en su relación con el flujo de trabajo. Usualmente, la realización de la LBS puede ser simple y rápida; sin embargo, mientras mayores diferencias existan entre las distintas partes internas de la estructura (es decir, mientras menos repetitiva sea la estructura), más complicada se tornará la elaboración. Según Kenley & Seppänen (2010), el máximo número de niveles de un LBS debería ser 6 y convendría seguir las siguientes consideraciones, salvo casos excepcionales, para los distintos niveles:

- Las locaciones en el nivel más alto deberían poder ser construidas independientemente de las otras de su mismo nivel. Estas locaciones son generalmente usadas para una visión macro del proyecto y para analizar posibles cambios de secuencias de estructuras para una mejora sustancial de la duración total del proyecto. Por ejemplo, edificios dentro de un condominio.
- Las locaciones en niveles medios deberían permitir que el flujo de trabajo sea planeado entre ellas. Por ejemplo, pisos en un edificio.

- Las locaciones en el nivel más bajo deberían ser lo suficientemente pequeñas como para que un capataz pueda verificar a simple vista si el trabajo realizado en dicho espacio es correcto. Por ejemplo, cuartos, corredores, entre otros.

2.3 Proyectos repetitivos y proyectos no repetitivos

Los proyectos pueden ser clasificados de una gran diversidad de formas; sin embargo, para los fines de la presente investigación se define una clasificación según el nivel de repetición de los componentes del proyecto.

2.3.1 Proyectos repetitivos

Son aquellos proyectos que dentro de sus componentes se identifica un patrón de repetición de trabajo y espacio que predomina y que se presenta en la mayor parte del proyecto. Vale recalcar que dicha predominancia puede ser total o parcial. Por ejemplo, en un proyecto de viviendas masivas de un piso, si dentro del alcance del proyecto solo se consideran acabados de las viviendas idénticas, el proyecto será 100% repetitivo; sin embargo, si se considera la fase de estructuras del mismo proyecto y se incluye el vaciado de una cisterna, el proyecto no es 100% repetitivo, pero aun así se considera “repetitivo” por la predominancia del patrón a repetir (una casa).

2.3.2 Proyectos no repetitivos

Son aquellos proyectos que cuentan con diferentes cantidades de trabajo y espacio en distintas locaciones y muchos de estos trabajos son únicos de una locación en específico (Seppänen O. , 2017). Por ejemplo, la construcción de un hospital es considerado un proyecto no repetitivo, porque tiene diversos espacios de diferente tamaño con algunos que requieren distintos trabajos comparados con otros. Cabe resaltar que un hospital también cuenta con partes repetitivas. Así, todo proyecto no repetitivo es una combinación de partes repetitivas y no repetitivas, entre las cuales predominan las no repetitivas (Seppänen O. , 2017).

2.4 Metodologías y herramientas relacionadas con la programación de proyectos de construcción

2.4.1 Virtual Design and Construction (VDC)

La filosofía o concepto Virtual Design and Construction (VDC) ha sido desarrollada y promovida principalmente por “The Center for Integrated Facility Engineering” (CIFE), en Stanford University, a lo largo de las últimas 3 décadas. Su uso es íntegramente multidisciplinario y desempeña un rol importante en la ejecución de modelos para el diseño y construcción. CIFE define VDC como el uso y desarrollo multidisciplinario de modelos en proyectos de diseño-construcción incluyendo los resultados finales, flujos de procesos y organización del equipo de diseño-construcción-operación en orden de responder y auspiciar los objetivos del negocio (Khazode, Fischer, Reed, & Ballard, 2006).

VDC permite a los profesionales o personas que emplean esta metodología a elaborar modelos simbólicos que representen el producto, la organización y proceso (P-O-P) antes de que exista un mayor compromiso de tiempo y dinero invertido en el proyecto. Por ello, respalda la descripción, explicación, evaluación, predicción, formulación de alternativas, negociación y decisiones sobre el alcance del proyecto, organización y plazo con métodos virtuales integrados.

El objetivo de VDC es, por lo tanto, utilizar modelos virtuales para representar y tomar decisiones sostenidas de los productos, organización y flujos de procesos para simular las complejidades de la entrega de un proyecto de construcción. Asimismo, entender las posibles fallas o vicios que el equipo de proyecto pueda detectar. Finalmente, analizar dichas fallas o vicios dentro de todo proyecto y poder representarlas en un mundo virtual antes de que el flujo de construcción se vea afectado en la realidad (Khazode, Fischer, Reed, & Ballard, 2006). Algunas de las principales herramientas VDC son las siguientes:

- Herramientas de visualización de productos
- Herramientas de modelación de productos y procesos
- Herramientas de modelación de organización y procesos
- Herramientas de colaboración online

Técnicas para analizar la efectividad de contar con múltiples stakeholders en reuniones que cumplan el objetivo del negocio por ambas partes (Proyecto y cliente).

Una de las áreas de investigación en VDC es la perspectiva del enfoque. Usando dicho concepto un equipo multidisciplinario de diseño, ingenieros y contratistas es posible, iterativamente, construir vistas ingenieriles geométricas, llamadas Vistas o Perspectivas, que progresivamente se van transformando en modelos conjuntos y logran representar adecuadamente el alcance deseado del elemento analizado. Por consiguiente, es posible cubrir el desarrollo y progreso del proyecto conforme este se va modificando y evolucionando (Khanzode, Fischer, Reed, & Ballard, 2006).

2.4.1.1 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) es una filosofía que se desprende a partir de los conceptos VDC. Su principal aporte y enfoque radica en la forma en la que se espera diseñar, construir y gestionar la operación de un proyecto, en el cual la representación digital del producto y proceso de construcción, basado en la interoperabilidad de formatos, es usado para facilitar el intercambio de información digital (Eastman, Liston, Sacks, & Liston, 2011). Podemos definir BIM como un grupo de políticas, procesos y tecnologías que interactúan para producir una metodología que permita gestionar el diseño esencial de la edificación y los datos del proyecto en formato digital a lo largo de todo el ciclo de vida del mismo (Succar, 2009). Es un proceso de generación y gestión de información de la edificación en un entorno interoperable y de constante reúso y actualización. Un sistema BIM o grupo de sistemas que permiten a los usuarios integrar y reusar la información de una edificación o proyecto y conocimiento del dominio a través del ciclo de vida de un edificio (Lee, Sacks, & Eastman, 2006). BIM es una práctica principalmente de la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC) cuyo esquema principal permite gestionar varios tipos de información, como la planificación de los recursos de la compañía, metrados de elementos, análisis de grupos de recursos, reportes técnicos, reportes de reuniones, entre otros. Sin embargo, el principal aporte de la metodología BIM es el modelado 3D, actualmente ampliado a un área 4D y 5D, próximamente expandida a 6D+ (Russell, Cho, & Cylwik, 2014).

BIM ha liderado un cambio de paradigma en la forma en que la información es gestionada, compartida y transformada para estimular una mayor colaboración entre todas las partes involucradas a través de un único modelo integrado durante las fases de diseño y construcción. (Alreshidi, Mourshed, & Rezugui, 2017) (Eastman, Liston, Sacks, & Liston, 2011). Este enfoque integrado de BIM garantiza el flujo de información entre todas las partes interesadas, el cual se especifica y articula a través de Niveles de Desarrollo o Diseño (LOD, por sus siglas en inglés) (Lin & Su, 2013), (Pärn, Edwards, & Sing, 2017). La metodología BIM y el LOD de cada proyecto son más precisas en cuanto aumenten en dimensiones formando modelos "nD". Estas dimensiones adicionales se definen como la

inclusión de información adicional a un modelo común de tres dimensiones con propósitos de mayor análisis o simulación (Pärn, Edwards, & Sing, 2017). De tal forma, es posible desarrollar modelos 3D (Volumetría), 4D (3D+Tiempo) y 5D (4D+Costo) en diferentes tipos de proyectos. De acuerdo al LOD del modelo que se realice surge un nuevo y amplio campo de investigación que integra los conceptos BIM en todas las etapas que un proyecto afronta. Ello corresponde al desarrollo de modelos 6D en el cual se inserten atributos que permitan gestionar y relacionar la data necesaria del Facility Management con el resto de datos del modelo (Oti, Kurul, Cheung, & Tah, 2016). De hecho, un edificio se compone de elementos geométricos que son la base del diseño de un edificio. Además, el modelado paramétrico proporciona mecanismos potentes que pueden automatizar la generación de la información de construcción (Pučko, Natasa, & Uros, 2014). Especialmente estos mecanismos junto con el comportamiento asignado a cada objeto de construcción y los sistemas basados en objetos facilitan el mantenimiento y la validez de los diseños del edificio. El entorno digital de libre acceso y dinámico que brindan las herramientas BIM permite almacenar, compartir e integrar información para la gestión total de una manera eficiente. Por consiguiente, el uso generalizado de BIM se vuelve extremadamente valioso para las organizaciones que buscan el valor inherente del proyecto y las ganancias producto de la tecnología (Pärn, Edwards, & Sing, 2017).

Aunque se han desarrollado soluciones BIM colaborativas, estas se han centrado principalmente en las dimensiones técnicas, a menudo sin la debida consideración a los aspectos socio-organizacionales, de proceso y legales. Para abordar esta limitación, los expertos de BIM han enfatizado la importancia de desarrollar soluciones de gobernanza que puedan facilitar la colaboración del equipo y mejorar el proceso de toma de decisiones durante un proyecto de construcción (Alreshidi, Mourshed, & Rezgui, 2017)

2.4.1.1.1 Niveles de Desarrollo BIM (LOD) – Niveles de Madurez

El nivel de madurez BIM ha sido propuesto para asegurar la clara articulación de los niveles de competencia esperados, las normas de apoyo, la orientación en relación a cada uno de los demás y como pueden ser aplicados a proyectos y contratos en la industria de la construcción. El propósito de definir niveles de madurez, precisamente niveles que van de 0 a 3 es de categorizar tipos técnicos y colaborativos de trabajo que permitan una descripción y entendimiento conciso del proceso, herramientas y técnicas a ser usadas.

Principalmente, se pretende reducir o eliminar la ambigüedad del uso del término “BIM” y detallarlo de forma simple y transparente para que el nivel en el que se encuentra una organización de indicios claros a sus clientes, cadena de suministros o proveedores del nivel de desarrollo en que esta instaurada la tecnología BIM y con que herramientas se

encuentra trabajando. La producción de esta categorización de madurez reconoce los diferentes participantes en la construcción y sus organizaciones de suministro se encuentran, actualmente, en diferentes niveles de experiencia, familiarización y enfoque respecto a BIM. Esta sirve como una estructura progresiva de aprendizaje por un periodo de tiempo definido por la institución que decide incorporar y aplicar BIM. Los niveles de desarrollo presentan las siguientes características mostradas en la Figura 9.

Nivel 0: uso de trazos a mano, herramientas CAD 2D independientes.

Nivel 1: manejo CAD en 2D y 3D con posibles formatos interoperativos básicos. Posiblemente, alguna herramienta de colaboración que proporciona un entorno de datos común, algunas estructuras y formatos de datos estándar. Datos comerciales administrados por paquetes independientes de gestión de costos y finanzas sin integración.

Nivel 2: entorno 3D administrado por herramientas "BIM" separadas con datos adjuntos. La integración sobre la base de interfaces propias o consideradas como "pBIM" (propietario). El enfoque puede utilizar datos 4D de programación y elementos de costo 5D, así como también sistemas operativos de alimentación.

Nivel 3: Proceso totalmente abierto e integración de datos habilitados por "servicios web" que cumplen con las normas IFC emergentes, administradas por un servidor de modelo colaborativo. Podría ser considerado como iBIM o BIM integrado que emplea potencialmente procesos de ingeniería concurrentes (Group, 2011)

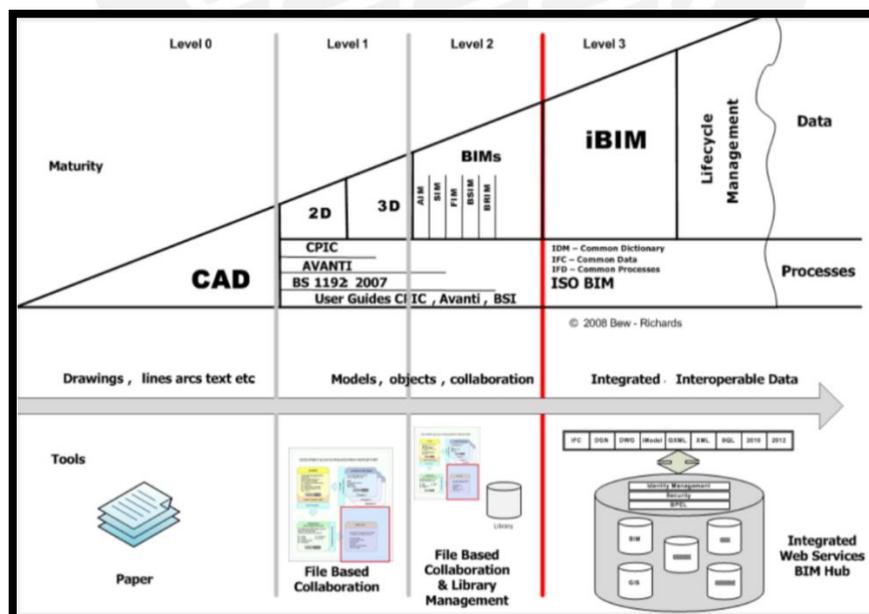


Figura 9: Mapa de desarrollo BIM según madurez (Group, 2011)

En el desarrollo e implementación de la metodología BIM en cualquier institución hay 3 campos de aplicación o de actividades que se interceptan. Estos son los siguientes: Tecnología, Proceso y Política (TPP). En estos campos se generan dos nuevos sub-campos como lo son: los actores y los entregables. La Figura 10 presenta los campos de aplicación y los traslapes entre estos.

Es importante identificar estos campos, dado que cada uno presenta un rol particular en el proceso de desarrollo BIM. Cada uno de estos debe satisfacer una necesidad y un aspecto que en un punto del proyecto va a ser necesario relacionar con otro. Por lo general, el desarrollo de cada uno de estos campos no es a la par, pero de suele mantener alineados los desarrollos de cada uno de estos para evitar contingencias.

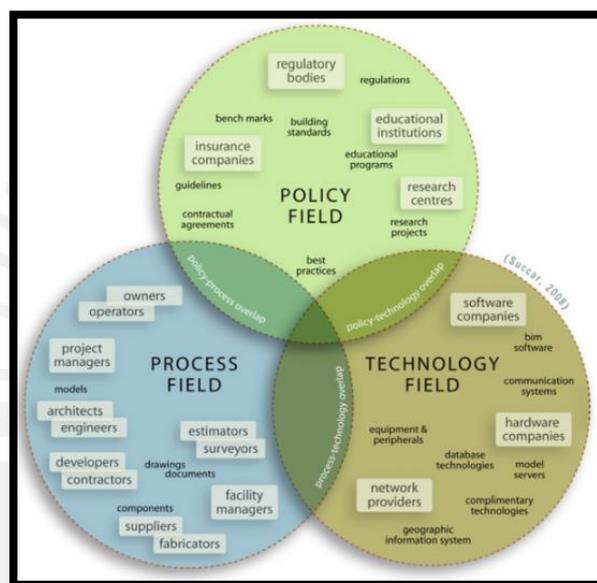


Figura 10: Campos de relación BIM (Succar, 2009)

Dentro de estos campos de relación BIM existen distintas interacciones las cuales pueden ser de carácter Pull, Push o Push-Pull de acorde al contexto y escenario presente. Por lo general, las interacciones de conocimiento son Push-Pull que ocurren dentro o entre campos y sub-campos como lo muestra la Figura 11. El mecanismo de transferencia de información Push envía conocimiento a otro campo o sub-campo mientras que los mecanismos Pull transfieren conocimiento para satisfacer una solicitud de otro campo o sub-campo. Aspecto muy sinérgico con la filosofía Lean Construction explicada en capítulos posteriores. Las transacciones de muestra incluyen transferencias de datos, dinámicas de equipo y relaciones contractuales entre campos y sub-campos. La identificación y representación de estas interacciones son un componente importante de los resultados del entorno (Succar, 2009).

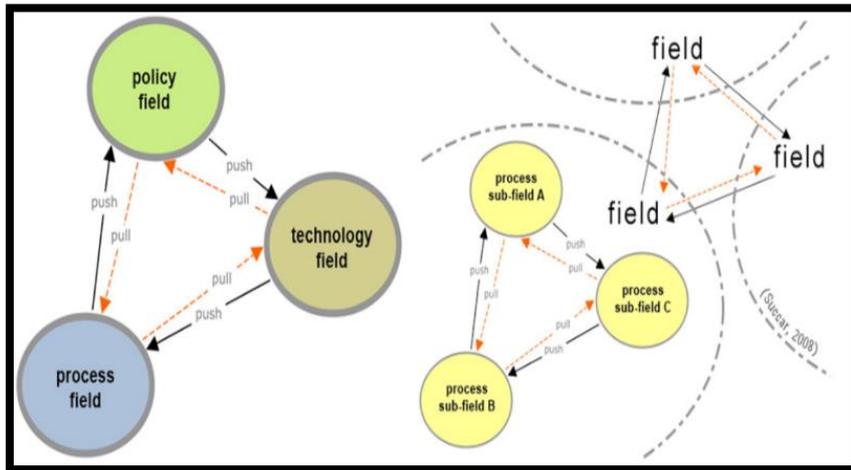


Figura 11: Relación Push - Pull de sub-campos de acción BIM (Succar, 2009)

El diseño es la actividad donde se define inicialmente una parte importante de la información sobre un proyecto y se establece la estructura de la documentación para agregar información en fases posteriores. En la Figura 12 se muestra un esquema de los servicios prestados dentro de las fases tradicionales de diseño. El contrato tradicional de servicios de arquitectura sugiere que el cronograma de pago, y por lo tanto la distribución del esfuerzo, sea del 15% para el diseño esquemático, del 30% para el desarrollo del diseño y del 55% para los documentos de construcción (Architects, 1994). Esta distribución se refleja en el peso tradicionalmente requerido para el diseño y generación de entregables como planos, cronogramas, protocolos, etc. de construcción. Debido a su capacidad de automatizar formas y procesos, BIM reduce significativamente la cantidad de tiempo requerida para producir documentos de construcción. Asimismo, se ilustra la relación entre el esfuerzo de diseño y el tiempo, indicando cómo se distribuye tradicionalmente el esfuerzo (línea 3) y cómo se puede redistribuir como resultado de aplicar BIM (línea 4). Asimismo, se presenta como se impactaría el valor, esfuerzo y tiempo del proyecto con el valor de las decisiones tomadas durante el proceso de diseño y construcción (línea 1) y el incremento en el costo producto de hacer cambios dentro de la ejecución del proyecto (línea 2). El cuadro enfatiza el impacto de las primeras decisiones de diseño en los costos y beneficios de la funcionalidad general de un proyecto de construcción. La estructura de costos en algunos proyectos ya está cambiando para reflejar el valor de las decisiones tomadas durante el diseño esquemático y el menor esfuerzo requerido para producir documentos de construcción (Eastman, Liston, Sacks, & Liston, 2011).

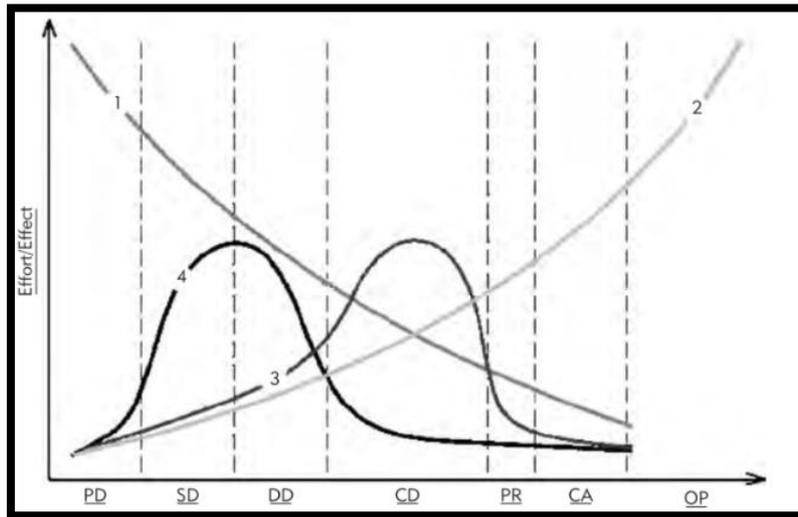


Figura 12: Costo de cambios, Diseño actual y Diseño BIM deseado (extraído de Eastman, Liston, Sacks, & Liston, 2008)

La implementación de BIM se inicia mediante el despliegue de un concepto definido como 'herramienta de software paramétrico 3D basada en objetos'. Evidentemente, detrás de dicho concepto se proponen que se debatan y analicen distintas opciones en un entorno colaborativo y experimentado de tal forma de poder optar por la mejor opción, software, representación y equipo de trabajo. En tanto la aplicación de BIM en el modelado del cual las demás actividades circulan se emplean distintos programas comerciales que cumplen con dicha función y se especializan o detallan en ciertos aspectos del sector construcción. De acuerdo a los niveles de desarrollo propuestos anteriormente, podemos detectar que la participación de la metodología BIM interviene cuando ya se trabaja en un entorno de Nivel 1. Entonces, la etapa 1 de desarrollo BIM responde a la necesidad de los usuarios por generar modelos de una sola disciplina dentro del diseño, construcción u operación del proyecto, las tres grandes fases del ciclo de vida del mismo. Los productos de modelado BIM en esta etapa, los cuales incluyen modelos de diseño arquitectónico y modelos de las diferentes instalaciones, son utilizados principalmente para automatizar la generación de planos y coordinación de la codificación (2D) y para optimizar la visualización "real" del proyecto concluido (3D). Otros entregables incluyen exportaciones de datos básicos (por ejemplo, cuadros de vanos, metrados exactos, comentarios puntuales, etc.) y modelos tridimensionales ligeros (por ejemplo, 3D DWF, 3D PDF, NWD, etc.) que no tienen atributos paramétricos modificables. Las prácticas colaborativas en la etapa 1 son similares al estado anterior a BIM y no hay intercambios de información significativos basados en modelos entre diferentes disciplinas. Los intercambios de datos entre los interesados del proyecto son unidireccionales y las comunicaciones continúan siendo asincrónicas e inconexas. Dado que solo ocurren cambios menores, persisten las relaciones contractuales pre-BIM, las asignaciones de riesgo y el comportamiento organizacional. Sin embargo, la naturaleza

semántica de los modelos basados en objetos y su deseo de resolución temprana y detallada de los asuntos de diseño y construcción alientan el seguimiento de las fases del ciclo de vida del proyecto. El modelado de esta etapa hipotetiza cómo basando en objetos el modelado fomenta el seguimiento rápido, cuando un proyecto todavía se ejecuta por etapas, pero las actividades de diseño y construcción se superponen para ahorrar tiempo.

Después de alcanzar la madurez en la etapa 1, los involucrados y analistas BIM reconocerán los beneficios potenciales de involucrar a otros interesados del diseño y construcción con capacidades similares de modelado. Tal reconocimiento y acción subsiguiente conducirán a estos a otro cambio revolucionario: la colaboración basada en modelos (Davila Delgado, Brilakis, & Middleton; Succar, 2009).

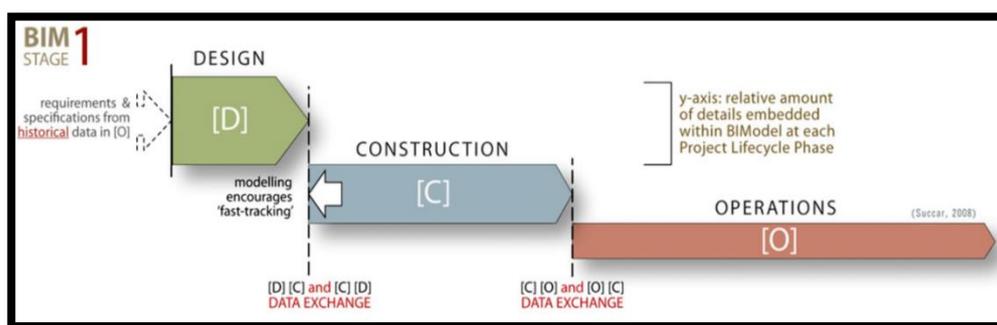


Figura 13: Etapa 1 del desarrollo BIM (Extraído de Succar, 2009)

Después de haber desarrollado una experiencia única de modelado unidisciplinario en las implementaciones de la etapa 1, todos los involucrados de la fase de planificación y diseño, en la etapa 2, colaboran activamente con otros especialistas para generar un ambiente multidisciplinario continuo. Esto puede ocurrir de muchas maneras tecnológicas después de la selección de cada una de las herramientas de software BIM por cada especialista. La colaboración entre estos incluye el intercambio (intercambio interoperable) de modelos o modelos parciales a través de formatos 'propietarios' (por ejemplo, entre Revit Architecture y Revit Structure a través del formato de archivo. RVT) y formatos no propietarios (por ejemplo, entre ArchiCAD y Tekla usando el formato de archivo IFC). La colaboración basada en modelos puede ocurrir dentro de uno o entre dos fases del ciclo de vida del proyecto. Ejemplos de esto incluyen el intercambio Diseño-Diseño (Design-Design) de modelos arquitectónicos y estructurales, el intercambio Diseño-Construcción (Design-Build) de modelos estructurales y de acero y el intercambio Diseño-Operaciones (Design-Operate) de modelos arquitectónicos y de mantenimiento de instalaciones. Es importante tener en cuenta que solo un modelo colaborador necesita contener datos geométricos 3D para permitir el intercambio entre dos disciplinas. Un ejemplo de esto es el intercambio (D-C) entre un modelo basado en objetos tridimensionales, una base de datos de programación

(P6 o MS Project) o una base de datos de estimación de costos. Tales intercambios permiten la generación de estudios 4D (análisis de tiempo) y 5D (estimación de costos), respectivamente. Aunque las comunicaciones entre los reproductores BIM continúan siendo las líneas de demarcación asincrónicas, pre-BIM que separan roles, disciplinas y fases del ciclo de vida comienzan a desvanecerse.

Algunas modificaciones contractuales se vuelven necesarias a medida que los intercambios basados en modelos aumentan y comienzan a reemplazar los flujos de trabajo basados en documentos. La madurez de la etapa 2 también altera la granularidad del modelado realizado en cada fase del ciclo de vida a medida que avanzan los modelos de construcción de detalles más altos y reemplazan, parcialmente o totalmente los modelos de diseño de detalles más bajos.

El modelo de conocimiento anterior hipotetiza cómo el modelo basado en la colaboración es un factor para promover un seguimiento rápido y cambiar la intensidad del modelado dentro de cada fase del ciclo de vida. La superposición representada está impulsada por los actores de la construcción que proporcionan cada vez más servicios relacionados con el diseño como parte de sus ofertas y los diseñadores agregan cada vez más información de construcción y compras a sus modelos de diseño (Ghaffarianhoseini, y otros, 2017; Succar, 2009).

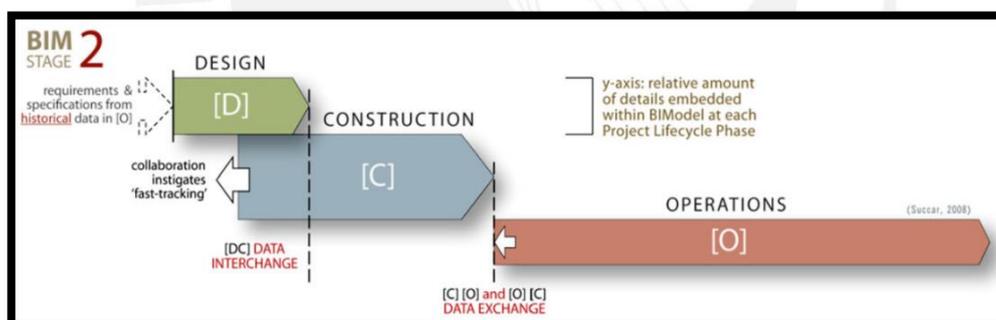


Figura 14: Etapa 2 del desarrollo BIM (Succar, 2009)

Finalmente, en la última etapa, se crean modelos semánticamente ricos, se comparten y se mantienen en colaboración a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Esta integración se puede lograr a través de tecnologías de servidor, integrando bases de datos federadas distribuidas y/o soluciones SaaS (Software as a Service). Los modelos BIM en la etapa 3 se convierten en modelos interdisciplinarios nD, permitiendo análisis complejos en etapas tempranas de diseño y construcción virtual. En esta etapa, los entregables del modelo se extienden más allá de las propiedades de los objetos semánticos para incluir inteligencia de negocios, principios de construcción, políticas verdes y costos del ciclo de vida completo. El trabajo colaborativo ahora es de forma iterativa en torno a un modelo de datos amplio,

unificado y compatible. Desde una perspectiva de proceso, intercambio de modelo con registro de su historia y datos basados en documentos hacen que las fases del ciclo de vida del proyecto se superpongan formando un proceso sin fases diferenciadas. Este modelo de conocimiento integra y provoca una construcción concurrente, un término utilizado cuando todas las actividades del proyecto están integradas y todos los aspectos de diseño, construcción y operación se planifican al mismo tiempo para maximizar el valor de las funciones objetivas y optimizar la capacidad de construcción, la operabilidad y la seguridad. La implementación de la etapa 3 de BIM requiere una reconsideración mayor de relaciones contractuales, modelos de asignación de riesgo y flujos de procedimientos. El requisito previo para todos estos cambios es el vencimiento de tecnologías de red / software que permiten un modelo interdisciplinario compartido para proporcionar acceso bidireccional a los interesados del proyecto. La madurez de todas estas tecnologías, procesos y políticas eventualmente facilitará la generación de relaciones IPD (Succar, 2009).

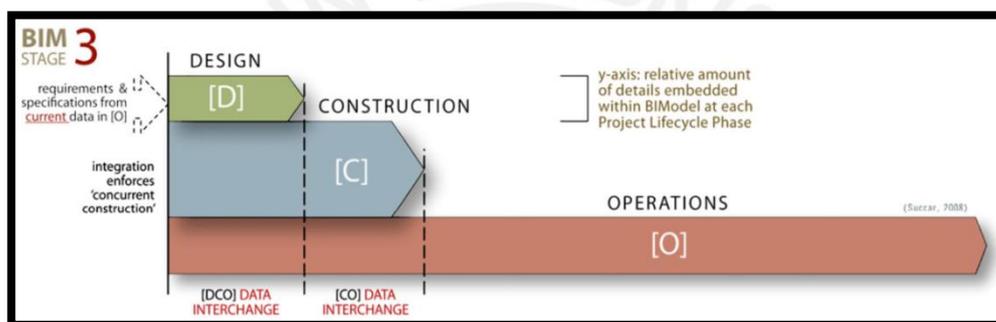


Figura 15: Etapa 3 del desarrollo BIM (Extraído de Succar, 2009)

2.4.2 Lean Production

Lean Production es una filosofía desarrollada por Toyota, dirigida por el ingeniero Taiichi Ohno quien era una persona muy inteligente y dedicada a eliminar el desperdicio en los flujos involucrados en el proceso de producción. El término "Lean" fue acuñado por el equipo de investigación que trabaja en la producción internacional de automóviles para reflejar tanto la naturaleza de reducción de desechos del sistema de producción de Toyota como para contrastarlo con las formas artesanales y masivas de producción (Howell, 1999).

Es ampliamente conocido que la era de la producción en masa comenzó después de que Henry Ford fuera pionero en la cadena de montaje para producir automóviles para la compañía Ford Motors. Cuando Henry Ford fue pionero en la línea de producción para construir los automóviles, lo hizo con énfasis en encontrar el mejor proceso para transformar las entradas en el proceso de producción en productos. Al construir la línea de montaje para automóviles, esencialmente descompuso el proceso de fabricación como una serie de

pasos distintos, organizó estos pasos en unidades en la línea de producción y luego organizó equipos especializados para administrar estas unidades. Esto revolucionó el proceso de fabricación del automóvil, ya que estos comenzaron a desplazarse por la línea de producción mucho más rápido que antes. Aunque revolucionó la producción, la producción masiva o el proceso de la cadena de producción tuvieron algunas consecuencias imprevistas. En la producción masiva, las unidades especializadas en la línea de ensamblaje comenzaron a enfocarse en su propio desempeño en lugar de todo el proceso de producción, lo que resultó en mucha concentración local que a veces fue contraproducente de la optimización del proceso como un todo. Asimismo, los problemas de calidad comenzaron a ser transferidos de estación en estación hacia los procesos finales de la línea, ya que los equipos que trabajan en la línea de montaje no se sentían capacitados o empoderados para detener la línea si percibían algún defecto o error en una de las partes producidas. Finalmente, los inventarios en cada una de las unidades comenzaron a aumentar, debido a que el énfasis en no detener la línea de producción obligó a los equipos a mantener el inventario a mano para continuar su trabajo cuando surjan problemas.

Ohno siguió el trabajo de Henry Ford y continuó el desarrollo de la gestión de producción basada en flujo. Pero a diferencia de Ford, que tenía una demanda casi ilimitada de un producto estándar, Ohno quería construir automóviles según el pedido de los clientes. A partir de los esfuerzos por reducir el tiempo de configuración de la máquina desarrolló un conjunto simple de objetivos para el diseño del sistema de producción: producir un automóvil según los requisitos de un cliente específico, entregarlo instantáneamente y no mantener inventarios o productos intermedios (Howell, 1999). En tal sentido se ocupó específicamente de estas consecuencias involuntarias de la producción en serie cuando diseñó el Sistema de producción de Toyota (TPS). Abordó el tema del óptimo lugar enfatizando la necesidad de optimizar todo el sistema en lugar de una sola unidad o proceso en particular. También empoderó a los trabajadores de la línea de producción dándoles la capacidad de detener la línea de producción si detectaban un problema de calidad para corregirlos apenas se detectaban y no al final del proceso. También se dio cuenta de que mantener el inventario no utilizado en cada unidad es un desperdicio y se suma al costo total de producción y decide reducir el nivel de inventario en cada estación a un mínimo, generando un sistema Pull. Toyota también diseñó el proceso de tal forma que sea flexible y pueda brindar a sus clientes lo que ellos estaban deseosos de poseer. Estos cambios ahora son ampliamente considerados como algunos de los elementos clave de un nuevo paradigma en la producción llamado Lean Production (Khanzode, Fischer, Reed, & Ballard, 2006).

2.4.2.1 Lean Construction

La industria de la construcción ha rechazado muchas ideas de producción y fabricación en masa o en serie provenientes de la industria de la manufactura debido a la creencia de que la construcción es diferente a cualquier otra industria, en especial, las desprendidas de procesos industrializados. Sin embargo, en el sector construcción los fabricantes o contratistas de cierta manera producen piezas o elementos que serán finalmente insertadas en los proyectos con la diferencia que por lo general estos procesos se dan in-situ. En ese sentido, un acertado diseño y la estructurada construcción de proyectos únicos y complejos en entornos altamente inciertos en los cuales se requieren importantes reducciones de tiempo y la presión del cronograma es muy importante y son, fundamentalmente, las diferencias de la construcción con otras grandes industrias de producción (Howell, 1999).

Lean Construction fue iniciada por el Lean Construction Institute (Ballard, 2008) y desde mediados de la década de 1990, la filosofía Lean Construction se ha convertido en un concepto "nuevo", tanto en la disciplina de la gestión de la construcción como en la práctica diaria de los procesos constructivos (Koskela, Ballard, & Tommelein, The foundations of lean construction, 2002). El Lean Construction Institute (LCI) se ha enfocado en aplicar los principios del sistema Lean Production de Toyota a la forma en que se ejecutan los proyectos de construcción. El LCI aboga por la filosofía de que los proyectos de construcción son realmente sistemas de producción y, por lo tanto, se pueden gestionar utilizando la teoría y técnicas de Lean Production como un sistema Pull en la medida de lo posible. LCI argumenta que, para abordar los problemas fundamentales de productividad en la industria, se necesita una nueva conceptualización de la construcción como sistema de producción (Howell, 1999). El primer objetivo de Lean Construction debe ser comprender completamente la "física" de la producción, los efectos de la dependencia y la variación a lo largo de las cadenas de suministro y montaje (Howell, 1999). Posteriormente, poder lograr el objetivo general de esta filosofía la cual es eliminar las pérdidas producidas en la construcción y entregar un producto de valor de acuerdo a los requerimientos que el cliente solicita, en el menor tiempo posible. La idea básica detrás de la filosofía es gestionar la entrega del proyecto de construcción como un sistema de producción Lean (Khanzode, Fischer, Reed, & Ballard, 2006). Se espera optimizar el tiempo total del proyecto a través de analizar actividad por actividad, suponiendo que se haya identificado el valor del cliente en el diseño. La producción se gestiona en un proyecto dividiendo primero el proyecto en fases y sub-fases, es decir, diseño y construcción, y luego colocando esas fases y sub-fases en una secuencia lógica, estimando el tiempo y los recursos necesarios para completar cada actividad y, por lo tanto, el proyecto. Cada fase o actividad se descompone aún más hasta que se subcontrata o se asigna a un jefe de tarea o capataz (Howell, 1999). Entonces, en general lo que la filosofía Lean Construction prioriza y desea establecer es un flujo de trabajo basándose en el hecho de que la construcción es realmente un conjunto de

actividades interdependientes pero distintas que deben fluir para completar el proyecto a tiempo y dentro del presupuesto (Koskela, Ballard, & Tommelein, The foundations of lean construction, 2002).

Diversos especialistas de la comunidad Lean Construction argumentan a favor de una desviación de la visión de la transformación tradicional de la construcción a una visión más holística que da igual importancia a los conceptos de valor y flujo junto con el concepto de transformación. La vista de transformación se refiere a la conceptualización de la construcción como una actividad en la que un conjunto de entradas se convierte en un conjunto de resultados y el proceso se gestiona para mantener esta transformación dentro de un conjunto de restricciones que generalmente incluyen costo, plazo, calidad, etc. se refiere al concepto de que la construcción realmente es un proceso en el que se genera valor para el propietario del proyecto (Khanzode, Fischer, Reed, & Ballard, 2006). Finalmente, el Lean Construction Institute ha propuesto una nueva forma de desarrollar proyectos de construcción sobre la base de los principios y la física de producción discutido anteriormente. Esta nueva forma se denomina Lean Project Delivery System (LPDS).

2.4.2.1.1 Lean Project Delivery System (LPDS)

La frase denomina “Lean Project Delivery System” se ha usado tradicionalmente para indicar la estructura contractual del proyecto, por ejemplo, Design-Bid-Build (DBB) o Design-Build (DB). “Delivery” en este contexto se entiende como un tipo de transacción. Por ello, una pregunta clave es cómo estructurar dicha transacción y sostenerla en el tiempo (Succar, 2009; Koskela, Ballard, & Tommelein, 2002). LPDS se concibe como un método de entrega de proyectos que conceptualiza los proyectos de diseño y construcción como sistemas de producción ajustada (Ballard, 2008).

Las obras de construcción comparten con los aviones y barcos la característica de que, en el proceso de ensamblaje, se vuelven demasiado grandes para moverse a través de las estaciones de trabajo, por lo que las estaciones de trabajo deben moverse a través de los productos. En consecuencia, los edificios, aviones y barcos se fabrican utilizando la fabricación de posición fija (Koskela, Ballard, & Tommelein, The foundations of lean construction, 2002).

Un proyecto de tipo LPDS es uno que está estructurado, controlado y mejorado en la búsqueda de los tres objetivos claves, es decir, los objetivos de transformación, flujo y valor propuestos. Lo que se necesita es una teoría de la producción y herramientas relacionadas que integren completamente los conceptos de transformación, flujo y valor. Como primer paso hacia tal integración, podemos conceptualizar la producción simultáneamente desde

estos tres puntos de vista: transformación, flujo y valor (TFV) (Koskela, 2000). La Tabla 1 presenta un resumen general del desarrollo de la teoría TFV de la cual parte el sistema LPDS.

Tabla 1: Teoría de producción TFV (Koskela, 2000)

	<i>Transformation view</i>	<i>Flow view</i>	<i>Value generation view</i>
<i>Conceptualization of production</i>	As a transformation of inputs into outputs	As a flow of material, composed of transformation, inspection, moving and waiting	As a process where value for the customer is created through fulfillment of his requirements
<i>Main principles</i>	Getting production realized efficiently	Elimination of waste (non-value-adding activities)	Elimination of value loss (achieved value in relation to best possible value)
<i>Methods and practices (examples)</i>	Work breakdown structure, MRP, Organizational Responsibility Chart	Continuous flow, pull production control, continuous improvement	Methods for requirements capture, Quality Function Deployment
<i>Practical contribution</i>	Taking care of what has to be done	Taking care that what is unnecessary is done as little as possible	Taking care that customer requirements are met in the best possible manner
<i>Suggested name for practical application of the view</i>	Task management	Flow management	Value management

Algunas de las características importantes de LPDS están en involucrar a los interesados intermedios en el proceso de planificación, conceptualizando de la entrega del proyecto como un proceso de generación de valor y creando un flujo de trabajo confiable entre los participantes del proyecto. Lean Project Delivery System, presenta un modelo prescriptivo para la gestión de proyectos, en el que la “Definición de Proyecto” se representa como un proceso de alineación de fines, medios y restricciones. La alineación se logra mediante una conversación que comienza con la declaración del cliente de los siguientes aspectos:

- Lo que quieren lograr (tener un lugar para vivir, capturar un mercado para los bienes que producen, proporcionar una escuela para que sus hijos puedan ser educados)
- Las restricciones (ubicación, costo, tiempo) en los medios para lograr sus fines

En este sentido, el profesional de la AEC no tiene ningún papel en la especificación del propósito y valor del cliente, ya que debe ser el quien determine las características, pero

esté consiente de cuáles son las limitaciones o restricciones presente a lo largo del proyecto (Ballard, 2008). Por ello, en el año 2000 Glenn Ballard propone el primer sistema LDPS mostrado en la Figura 16. Este tipo de desarrollo de proyecto estaba conformado por 4 triadas en las que se agrupaban fases internas que debían ser ejecutadas para completar las distintas etapas de un proyecto de construcción. El proceso pivot era aquel que formaba parte de dos triadas y se ubicaba en la intercepción de estos. Este era aquel que debía entregar los outputs de la fase previa como Inputs a la fase sucesiva para poder continuar con el flujo establecido. En esta primera conceptualización del LPDS podemos apreciar que se consideraba que el proyecto de construcción era considerado hasta la fase de construcción y culminado con la entrega y puesta en marcha (Ballard, 2000a).

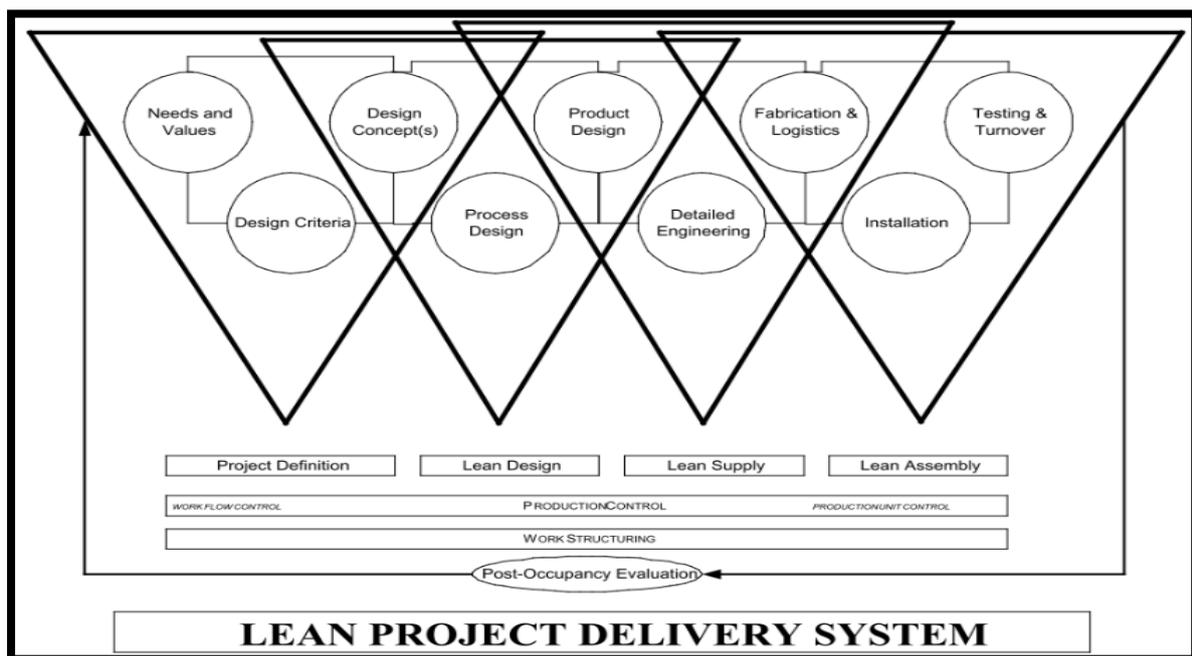


Figura 16: Lean Project Delivery System (Ballard, 2000a)

Luego de unos años, precisamente en el 2008, Glenn Ballard publica una actualización de su publicación del 2000 en la cual reformula en cierta medida el LPDS y presenta una fase más, la fase de uso con dos procesos más, en el alcance del proyecto de construcción. Este es el modelo actual, el cual consiste de 5 fases de proyecto.

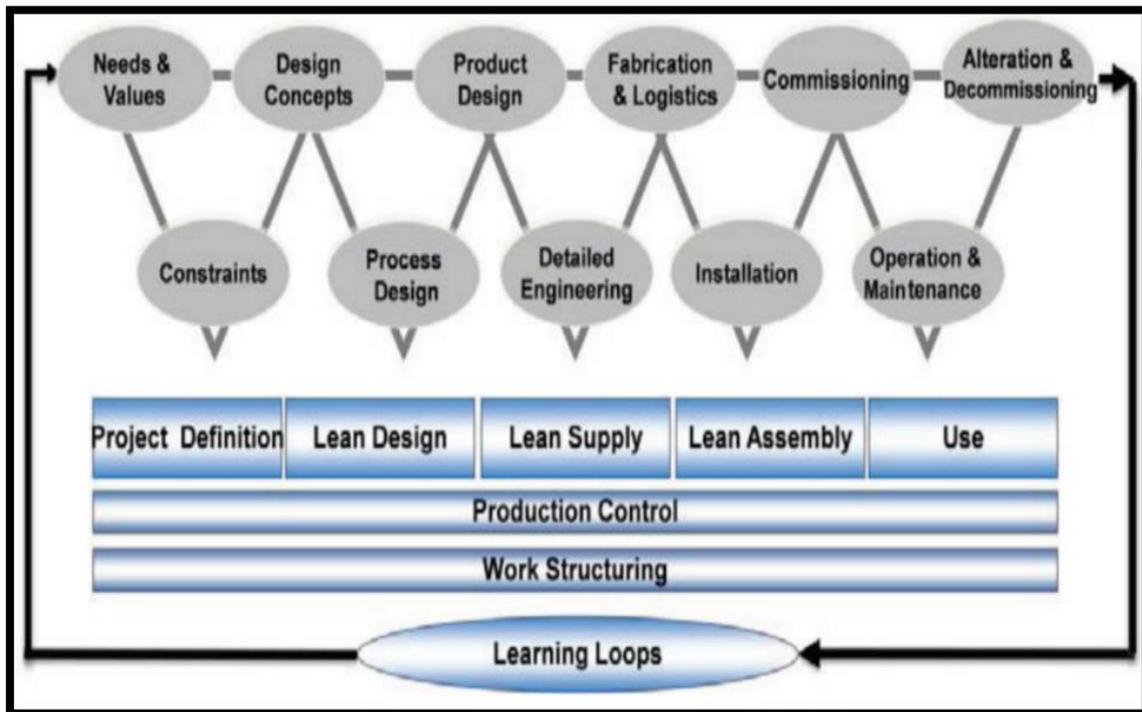


Figura 17: Lean Project Delivery System (Ballard, 2008)

En el sistema Lean Project Delivery System, se asume que el trabajo del equipo de entrega del proyecto no es solo proporcionar lo que el cliente quiere, sino ayudar primero al cliente a decidir lo que quiere. En consecuencia, es necesario comprender el propósito y las limitaciones del cliente, exponer al cliente a medios alternativos para lograr sus propósitos más allá de aquellos que han considerado previamente, y ayudar a los clientes a comprender las consecuencias de sus deseos. Este proceso inevitablemente cambia todas las variables: fines, medios y restricciones (Ballard, 2008). Los proyectos del LPDS están estructurados para perseguir los objetivos del TVF mediante la aplicación de muchos principios y técnicas. Asimismo, presentan una jerarquía de fines y medios más desarrollados las cuales incluyen los siguientes aspectos (Koskela, Ballard, & Tommelein, The foundations of lean construction, 2002):

- Involucrar a los participantes de etapas iniciales en las decisiones de estas posteriores y viceversa.
- Aplazar los compromisos hasta el último momento responsable, lo cual puede entenderse como la metodología Last Planner System (LPS)
- Alinear los intereses de los participantes, por ejemplo, para que el productor siempre tenga interés en maximizar el valor para el cliente

- Seleccionar, dimensionar y ubicar los buffers para absorber la variabilidad y hacer coincidir el valor del tiempo versus el costo para cada cliente. La Tabla 2 presenta una comparación entre los beneficios de aplicar mitología Lean Construction a través del cumplimiento del TFV y LPDS con el desarrollo tradicional de proyectos.

Tabla 2: Comparación del LPDS vs el método tradicional (Koskela, Ballard, & Tommelein, 2002)

Lean	Traditional
Focus is on the production system	Focus is on transactions and contracts
TFV goal	T goal
Downstream players are involved in upstream decisions	Decisions are made sequentially by specialists and 'thrown over the wall'
Product and process are designed together	Product design is completed, then process design begins
All product life cycle stages are considered in design	Not all product life cycle stages are considered in design
Activities are performed at the last responsible moment	Activities are performed as soon as possible
Systematic efforts are made to reduce supply chain lead times	Separate organizations link together through the market, and take what the market offers
Learning is incorporated into project, firm, and supply chain management	Learning occurs sporadically
Stakeholder interests are aligned	Stakeholder interests are not aligned
Buffers are sized and located to perform their function of absorbing system variability	Participants build up large inventories to protect their own interests

2.4.2.1.2 Last Planner System (LPS)

Last Planner System (LPS) o Sistema del Último Planificador en el contexto local es un sistema de planificación de la producción diseñado para definir y establecer un flujo de trabajo predecible y un aprendizaje rápido en programación, diseño, construcción y puesta en marcha de proyectos (Ballard, 2000b) (Koskela, An Exploration towards a Production Theory and its Application to Construction, 2000). Last Planner System ha sido una de las herramientas de Lean Construction más populares, ya que ofrece una solución para abordar los problemas de la gestión de producción en obras de construcción. Desde su creación hace casi 20 años, las empresas de construcción de todo el mundo han implementado Last Planner con éxito (Dave, Hämäläinen, Kemmer, Koskela, & Koskenvesa, 2015).

LPS fue creado por Glenn Ballard a principios de la década de 1990 como un sistema para el control de producción de proyectos. Se pensaba que el control de la producción era una pieza que faltaba en el conjunto de herramientas de gestión de proyectos (Ballard, 2000b). LPS une dos lados de la gestión de la construcción. En primer lugar, establece una secuencia de actividades y herramientas para el control del proyecto en análisis, supervisa

el costo del proyecto y los objetivos del cronograma. En segundo lugar, el control de producción que desarrolla estrategias para lograr esos objetivos. (Ballard & Tommelein, 2016).

El desarrollo clave del LPS es la confiabilidad del flujo de trabajo de los proyectos de construcción. LPS establece que una buena planificación ocurre cuando se superan los obstáculos que se han producido en la industria de la construcción, como: (1) La planificación no se considera un sistema, sino que se basa en las capacidades y talentos del profesional a cargo de la programación; (2) el rendimiento del sistema de planificación no se mide; (3) los errores en la programación no se analizan, y las causas de ellos no se identifican (Ballard, 2000b). Por lo tanto, LPS tiene como objetivo reducir la brecha entre lo planeado y lo ejecutado.

LPS ofrece 5 principales herramientas para cumplir con el objetivo propuesto las cuales son las siguientes:

- (1) Programación maestra, en esta se define qué se debe hacer, cuándo y por quién, de tal forma que se determinan de hitos y estrategias para cumplir
- (2) Planificación de fase, en la cual se programan tareas de tal manera que estas se puedan ejecutar. Se especifican transferencias e identificar conflictos operacionales
- (3) Look Ahead: planificar y prever restricciones en un horizonte de tiempo definido por el planificador, se debe analizar las tareas futuras y las posibles restricciones que se generen para poder garantizar el flujo de trabajo Se planifica las tareas para que se puedan hacer y, caso contrario, se vuelve a planificar según sea necesario
- (4) Planificación semanal del trabajo: compromisos para realizar el trabajo de cierta manera y una determinada secuencia
- (5) Medir el porcentaje del plan completado (PPC), profundizar en las razones del fracaso, desarrollar e implementar las lecciones aprendidas (Ballard, 2000b).

Los métodos de programación más populares en el LPS son el Tren de trabajo, en contexto nacional, o Takt-Time Planning (TTP) y Líneas de flujo o flowlines. El objetivo de Tren de trabajo es reducir la variabilidad en los procesos posteriores determinando el ritmo de producción de las actividades estándar en las zonas de tamaño adecuado, que podrían variar en distintas fases de trabajo (Brioso, Murguía, & Urbina, 2017), (Frandsen, Berghede, & Tommelein, 2013). La secuencia de actividades debe determinarse y lograrse de acuerdo con la duración y el tamaño de la cuadrilla (Linnik, Berghede, & Ballard, 2013). Mientras tanto, el método de flujo es una representación gráfica del Sistema de gestión basado en

locaciones (LBMS) donde se muestra explícitamente el espacio de trabajo como un recurso (Frandsen, Seppänen, & Tommelein, 2015) y que transforma cantidades en ubicaciones e información de productividad a duraciones confiables, hace que los buffers sean explícitos y pronostica el desempeño futuro en base a tendencias históricas y alertas de problemas de producción futura, cuya principal herramienta son las líneas de flujo en la representación del cronograma (Seppänen, Ballard, & Pesonen, 2010).

3. ESTUDIO DE CASO 1

3.1 Descripción del proyecto

3.1.1 Presentación de la información del proyecto

El caso de estudio motivo del presente trabajo de tesis forma parte de un conjunto de estructuras realizadas por la empresa MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C durante el año 2006. Dicha empresa realizó los trabajos descritos a continuación bajo la condición de subcontratista, por lo que las actividades a desarrollar se veían supeditadas al avance y entrega de frentes de trabajo por parte del contratista, cliente de MECTEC CNTRATISTAS GENERALES S.A.C.

El alcance considera la habilitación, transformación, pintado y montaje de la estructura metálica del edificio de inspección visual de camiones de transporte de carga internacional E-15 del complejo fronterizo Santa Rosa ubicado en la carretera panamericana sur Km. 1,336.00 Tacna - Perú. No es parte del alcance de la empresa en mención la ejecución de cimentaciones e instalaciones ni estructuras de concreto, pero que para fines académicos y

de simulación se incorporarán a la programación de fase sugerida por los autores.



Figura 18: Ubicación del Complejo Fronterizo Sata Rosa (Adaptado de Google, 2016)

La estructura metálica cuenta de una configuración rectangular de 16.55 m de ancho por 60.00 m de largo, abarcando un área total de 993m² con pendiente en los cuatro lados de la misma, elevada de la cota de terreno (+92.45) 1.30m de tal forma que el nivel de columna inicia en la cota (+93.75) para permitir que el personal encargado de la inspección pueda observar el contenido de los vehículos de transporte con mayor facilidad.

- Lo elementos que conforman la estructura metálica en mención se detallan a continuación:
- 14 columnas metálicas CM-1 de tipo W 12x65 con una placa base de 0.40mx0.40mx1"
- 4 columnas metálicas CM-1A de tipo W 12x65 con una placa base de 0.40mx0.40mx1" y una variante constituida por un empalme rotado soldado a una placa base y empernado en la parte superior de la misma.
- 2 columnas CM-2 de tipo W 6x15 con una placa base de 0.30mx0.30mx3/4".
- 5 tijerales T-1 constituidos por ángulos tipo 2" x 2" x 3/16", 2½" x 2½" x 1/4" y 2½" x 2½" x 3/16" soldados entre si y reforzados con cartelas de dimensiones variables y espesor ¼".

- 2 tijerales T-2 constituidos por ángulos tipo 2" x 2" x 3/16", 2½" x 2½" x 1/4" y 2½" x 2½" x 3/16" soldados entre si y reforzados con cartelas de dimensiones variables y espesor ¼".
- 4 tijerales T-3 constituidos por ángulos tipo 2" x 2" x 3/16", 2½" x 2½" x 1/4" y 2½" x 2½" x 3/16" soldados entre si y reforzados con cartelas de dimensiones variables y espesor ¼".
- 4 tijerales T-4 constituidos por ángulos tipo 2" x 2" x 3/16", 2½" x 2½" x 1/4" y 2½" x 2½" x 3/16" soldados entre si y reforzados con cartelas de dimensiones variables y espesor ¼".
- 12 tijerales T-5 de arriostre constituidos por ángulos tipo 2" x 2" x 3/16", 2½" x 2½" x 1/4" y 2½" x 2½" x 3/16" soldados entre si y reforzados con cartelas de dimensiones variables y espesor ¼".
- Viguetas constituidas por canales C tipo 8" x 3" x 2.5 y 8" x 3" x 3.0 en toda el área techada.
- Templadores de vigueta tipo barra lisa de ½" de diámetro.



Figura 19: Estructura montada en su totalidad e iniciando pintura (fuente propia)

Las estructuras metálicas fueron fabricadas en taller propio de la empresa en la ciudad de Lima, en el cual se realizó el habilitado, armado y fabricación de todos los elementos necesarios para luego subcontratar el servicio de perforación de todas las piezas empernadas de la estructura y enviar en camiones los lotes de estructuras a la ciudad de Tacna.

3.1.2 Metodología usada para el proyecto

En el presente proyecto no se utilizó ninguna metodología sistematizada o documentada a lo largo del mismo. Es decir, no se aplicaron herramientas de planificación y gestión que permitan darle seguimiento a la obra y poder evaluar el desempeño de la misma en sus diferentes bases.

Para determinar el plazo del proyecto se hizo uso de un cronograma a través de un diagrama de Gantt planificado (Anexo 3) en una hoja de Excel en donde se puede apreciar que básicamente este fue realizado según una correlación de hitos lógicos que permiten seguir una secuencia de trabajo y actividades, pero con información muy básica y limitada que pierde vigencia ante el primer cambio que se suscite.

Se estimó la cantidad de cuadrillas que se requerirían en el proyecto y los miembros que conformarían estas en base a la experiencia y la cantidad de personal disponible y de acuerdo en realizar sus labores en la ciudad de Tacna.

Durante el proceso de ejecución, no se contó con ninguna herramienta o técnica que documente y permita visualizar la información del avance real, los cambios realizados, el estado económico a la fecha y, principalmente, la ubicación que se encuentra ejecutando el personal a cargo en cada día. Es importante mencionar que la disponibilidad de tecnología, softwares y técnicas en aquellos años era distinta a la actual. Sin embargo, se cumplía con éxito las expectativas del cliente.

Para el cumplimiento de las especificaciones de calidad y las actividades de montaje, se realizaban protocolos de calidad, tanto en soldadura como en pintura, y protocolos de montaje, los cuales eran proporcionados por el cliente y no eran propios de la empresa.

En cuanto al costo del proyecto y la forma de gestionar los costos fueron a través de un presupuesto general aprobado al inicio del proyecto y, a continuación, solo se registraban los gastos por órdenes de compras (OC) y se registraban los gastos realizados semanalmente en el proyecto. Como documento para registrar el plazo final y real ejecutado se realizó un diagrama de Gantt de cierre, indicando los plazos reales de ejecución de cada actividad descrita en el mismo (Anexo 4).

3.1.3 Principales dificultades en la planificación

En cuanto a los principales problemas relacionados a la planificación en dicho proyecto se pueden resaltar los problemas relacionados a la logística, los cuales alteraban y ocasionaban retrasos o tiempos improductivos en obra. Asimismo, la escasez de recursos

en la zona de proyecto era un condicionante muy relevante para el desarrollo eficiente del mismo, puesto que se presentaron distintas trabas que se debieron solucionar en campo y que escapaban a lo provisto; finalmente, los problemas producto de la ausencia de una metodología de gestión y herramientas tecnológicas que faciliten el control del costo, plazo y cambios en el proyecto.

A continuación, se procederá a listar los principales problemas expuestos por personal participe del proyecto

- Ausencia de maquinaria pesada para la ejecución del montaje de las estructuras, durante dicho proceso solo se contó con una grúa de poca capacidad, dado que no se contaban con otras disponibles en la zona del proyecto; por ello, se tuvo que realizar montajes manuales de algunas piezas, en especial las viguetas y templadores individualmente.
- Retrasos en la llegada de los elementos de fabricación desde Lima a Tacna por diferentes motivos entre los cuales se puede mencionar los siguientes:
- Guías de remisión erradas, operativos policiales y problemas mecánico-técnicos con los camiones. Lo que produjo retrasos de hasta 10 días en la llegada de las piezas.
- Asignación de tareas suplentes que no representan avance o producción significativa para el proyecto.
- Decisión de actividades sobre la marcha, debido a la ausencia de una planificación detallada por días que permita organizar de manera ideal el flujo de trabajo y las cuadrillas necesarias para cada actividad
- Gran parte del personal se ausentaba gran cantidad de días laborables por diferentes motivos, lo cual complicaba gravemente el desarrollo de las actividades diarias y se debía recurrir a buscar mano de obra local, la cual no era experimentada y la productividad decrecía aún más.
- La incompatibilidad de planos de cimentaciones y de estructuras fue un gran problema pues se puso en riesgo gran parte de las estructuras que ya estaban fabricadas. Finalmente, se respetó el plano de cimentaciones, dado que estas ya estaban ejecutadas.
- Constantes contratiempos cuando era necesario adquirir insumos básicos, puesto que cerca de la zona de trabajo no era posible adquirir recursos.

Estos tenían que ser comprados en la ciudad de Tacna, por lo cual la pérdida de tiempo era sustancial

- Cambios en el diseño durante la ejecución y fabricación de los elementos produjeron pérdidas económicas y de plazo, puesto que se tuvieron que realizar dichos cambios en campo con el personal que debería realizar actividades diferentes.

3.2 Elaboración de modelo 3D

En el proceso de desarrollo del presente documento y obtención de resultados a partir de los modelos generados se utilizarán dos softwares BIM, los cuales ya fueron mencionados en capítulos previos.

Se presentará el proceso de elaboración del modelo en Tekla Structure 21.1 y, posteriormente, el proceso de programación desarrollado en VICO Office R5.3 del cual se obtiene las líneas de flujo y los resultados presentados en el capítulo 5.

Dado que el caso de estudio seleccionado cuenta con planos en 2D de AutoCAD (Anexos 5, 6, 7 y 8), se tomarán como referencia los mismos para determinar las dimensiones, tipo de elementos y detalles necesarios. Dichos planos serán presentados anexos al final del documento.

Luego de describir el proceso realizado para lograr el modelo en Tekla Structures 21.1, se procederá a mencionar las principales incompatibilidades detectadas en el desarrollo del mismo, es decir presentar los errores, limitaciones o vacíos que poseen los planos 2D de AutoCAD en el proceso de modelado 3D. Asimismo, se indicará las decisiones tomadas para continuar con el modelado y el motivo por la cual se optó por cada solución realizada.

3.2.1 Tekla Structures 21.1

En el presente capítulo se presentará el proceso de modelado en Tekla Structures 21.1 resumido, de tal forma de poder mostrar los pasos más importantes que se han tomado durante el desarrollo del mismo. Asimismo, el modelo final elaborado llega a un nivel de detalle suficiente para poder ser exportado a VICO Office y facilitar la obtención de resultados concluyentes para el sustento del presente documento.

3.2.1.1 Fases del desarrollo del modelo

Fase 1

Una vez que se cuenta con el Software correctamente instalado en la computadora de preferencia se procede a abrir este y determinar la configuración inicial del mismo donde se debe seleccionar el entorno o sistema de unidades, la función y la configuración. En la elección del entorno o sistema de unidades se seleccionó “US Imperial” por motivos de facilidad en la selección de perfiles de acero. El campo de función se determinó como “Steel Detailing” por el tipo de modelo que se desea realizar básicamente de estructuras metálicas y la configuración fue del tipo “Educativa”, ya que la licencia utilizada es para esos fines.

De contarse con la licencia completa, se seleccionaría la configuración de tipo “Completa”

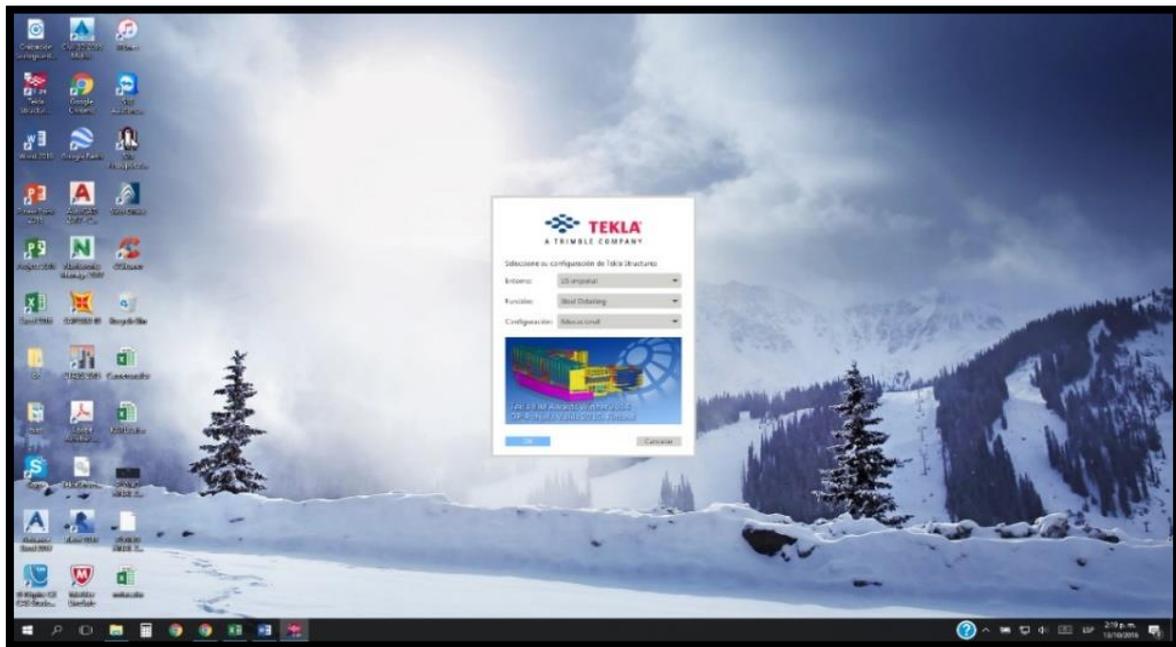


Figura 20: Inicio del software y selección de configuración (fuente propia)

Fase 2

Una vez seleccionados los campos de configuración se procede a ingresar al software. Por ello, en la pestaña de archivo seleccionamos nuevo y aparecerá una ventana en la cual deberemos elegir la ruta de guardado del modelo a realizar, el nombre del proyecto, una plantilla de ser necesario o desarrollada previamente y el tipo de modelo que se desarrollará.

El modelo realizado tiene una ruta de guardado a decisión propia, como nombre “TESIS AUS/DRSD”, ningún tipo de plantilla y por ser un modelo desarrollado personalmente, es decir sin trabajar en múltiples usuarios o en red bajo un servidor, el tipo de modelo es “Usuario único”.

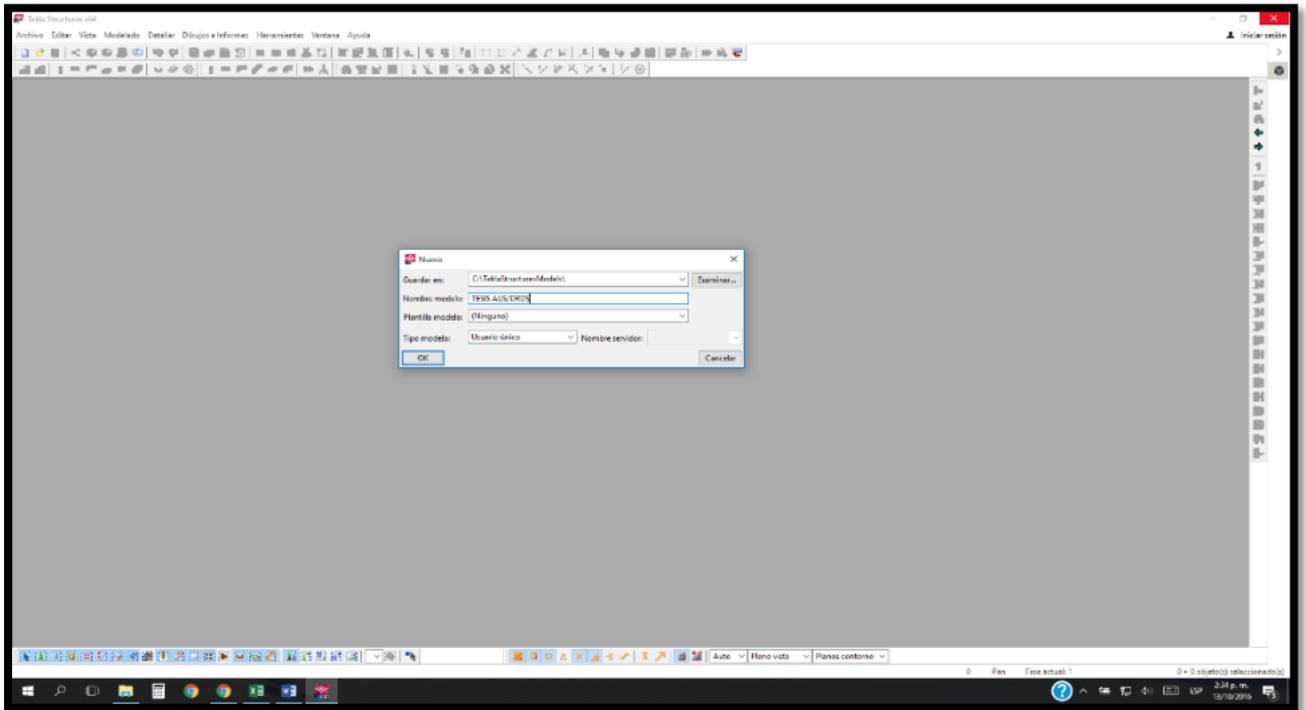


Figura 21: Interfaz inicial de Tekla Structure 21.0 (fuente propia)

Fase 3

Al ubicarnos en la interfaz principal del modelo, lo primero que debemos realizar es la determinación de ejes de referencia longitudinales y transversales o grilla. Este proceso se realiza ingresando a la configuración de grilla y colocando directamente las dimensiones y distribución deseada.

Debido a que el modelo a realizar está basado en planos 2D de AutoCAD se toman las dimensiones del mismo y se procede a configurar la grilla de tal forma que coincida con el plano.

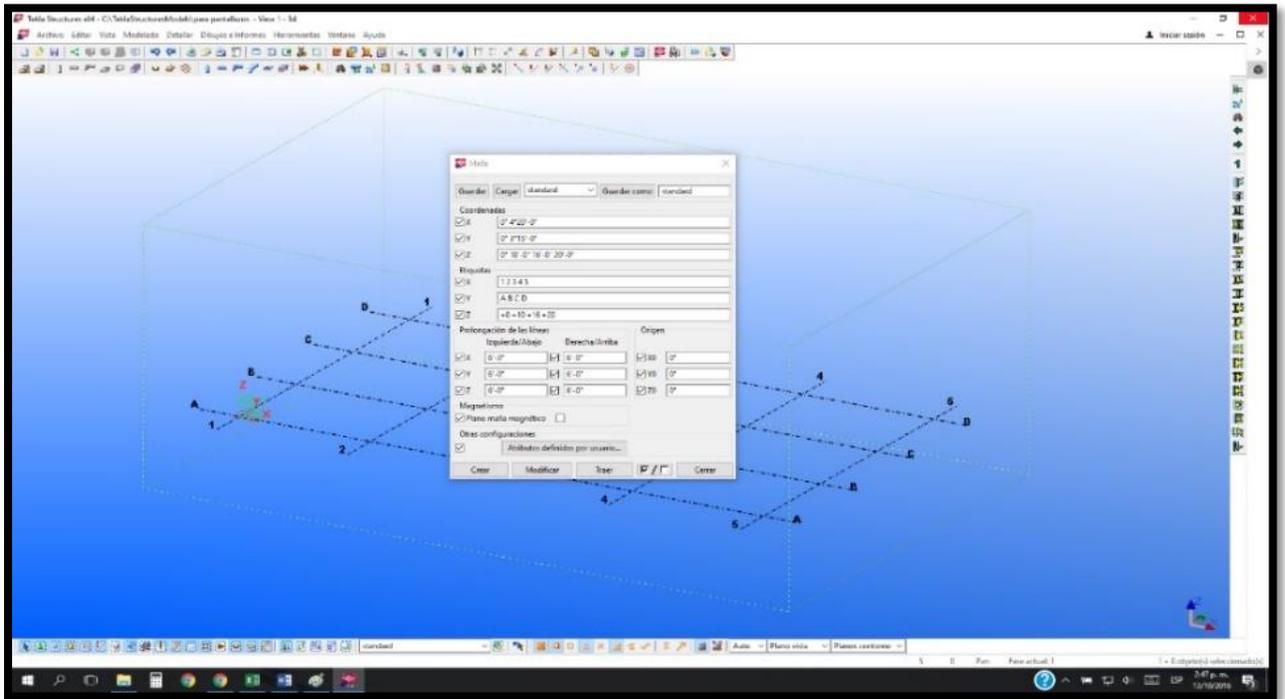


Figura 22: Configuración de grilla de trabajo (fuente propia)

Fase 4

Luego, se importa el plano 2D de AutoCAD a Tekla Structures 21.1. como plantilla. Para ello, dicho plano debe ser un archivo independiente lo más limpio y sencillo posible para simplificar la visualización y el trazado de los elementos.

Para introducir el plano 2D ingresamos a la opción de “Modelos de referencia” en la esquina superior derecha de la interfaz, introducimos la ubicación del archivo y lo escalamos a 1,000 dado que trabajaremos en milímetros para aumentar la precisión de los elementos.

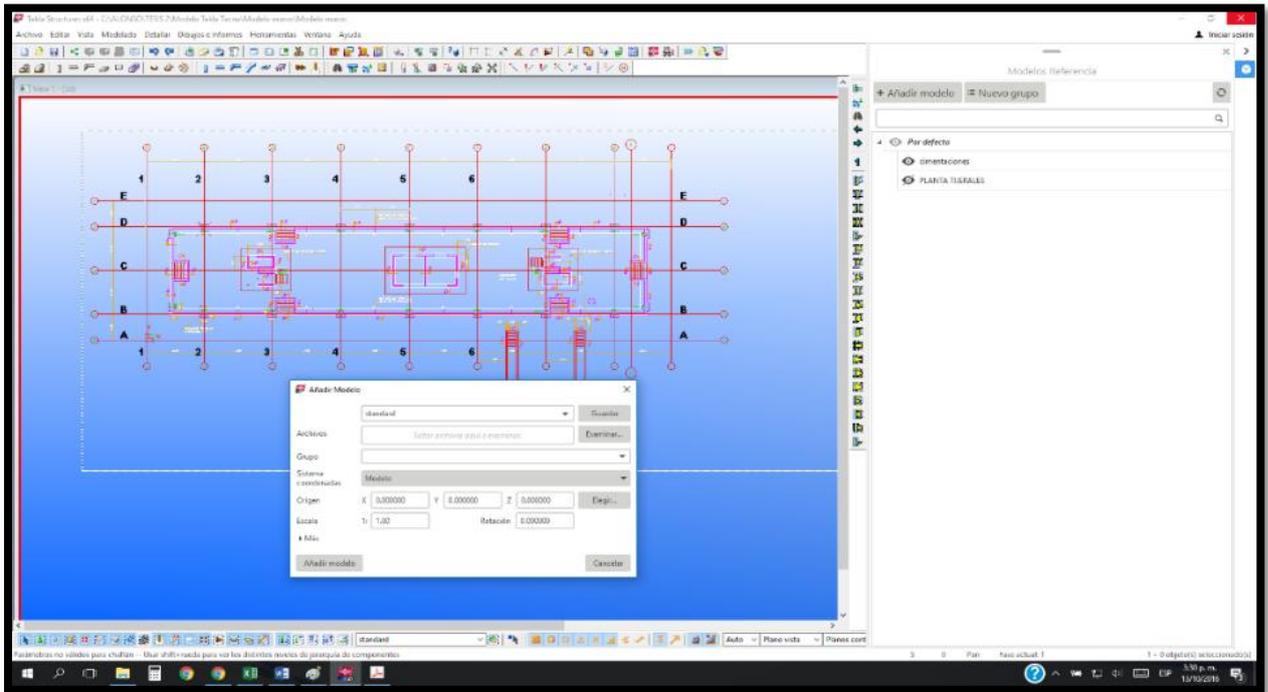


Figura 23: Plano 2D importado a Tekla Structures 21.1 (fuente propia)

Fase 5

Se inicia el modelado de los distintos elementos. En primer lugar, el cimiento corrido, el cual se realiza con el comando “Crear zapata continua” ubicado en la esquina superior izquierda de la interfaz. De manera muy similar, modelamos los pedestales independientes a través del comando “Crear zapata aislada”. La variante entre estos comandos simplemente radica en que para modelar una zapata continua se necesita trazar la geometría requerida mientras que para la zapa individual simplemente a partir de un punto se crea un elemento rectangular, luego modificable a discreción.

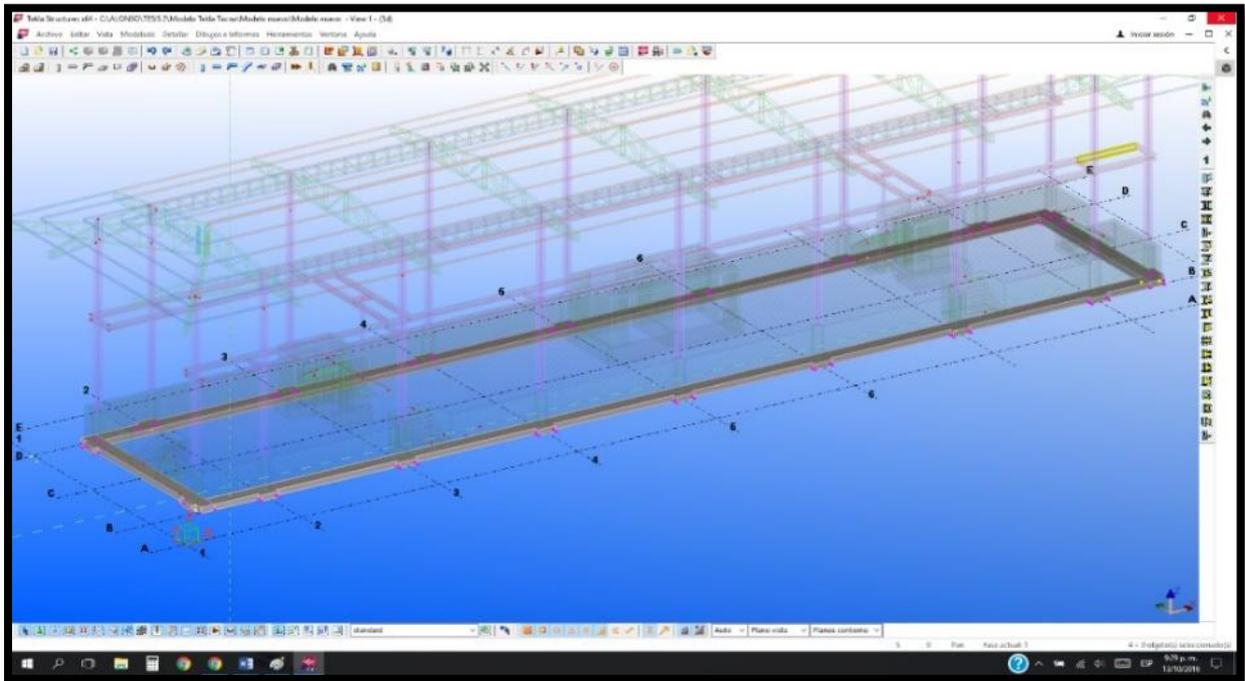


Figura 24: Trazo del cimiento corrido (fuente propia)

Una vez que se ha creado el cimiento de concreto se procede a determinar las propiedades del mismo donde principalmente se determina el nombre del elemento, el espesor, el material y la posición dentro de otras varias opciones para detallar dicho elemento según sea necesario.

Fase 6

Se procede a insertar al elemento modelado el acero de refuerzo indicado en planos. Para ello, se utiliza el comando “Crear grupo de armaduras” donde se selecciona el elemento a reforzar, se determina la forma de la barra y el rango a reforzar. Una vez agregada la armadura requerida se procede a detallar las propiedades que sean necesarias como el nombre del elemento, el tamaño de las barras, el tipo de material, los ganchos necesarios, los recubrimientos y más especificaciones que dependen del nivel de detalle deseado.

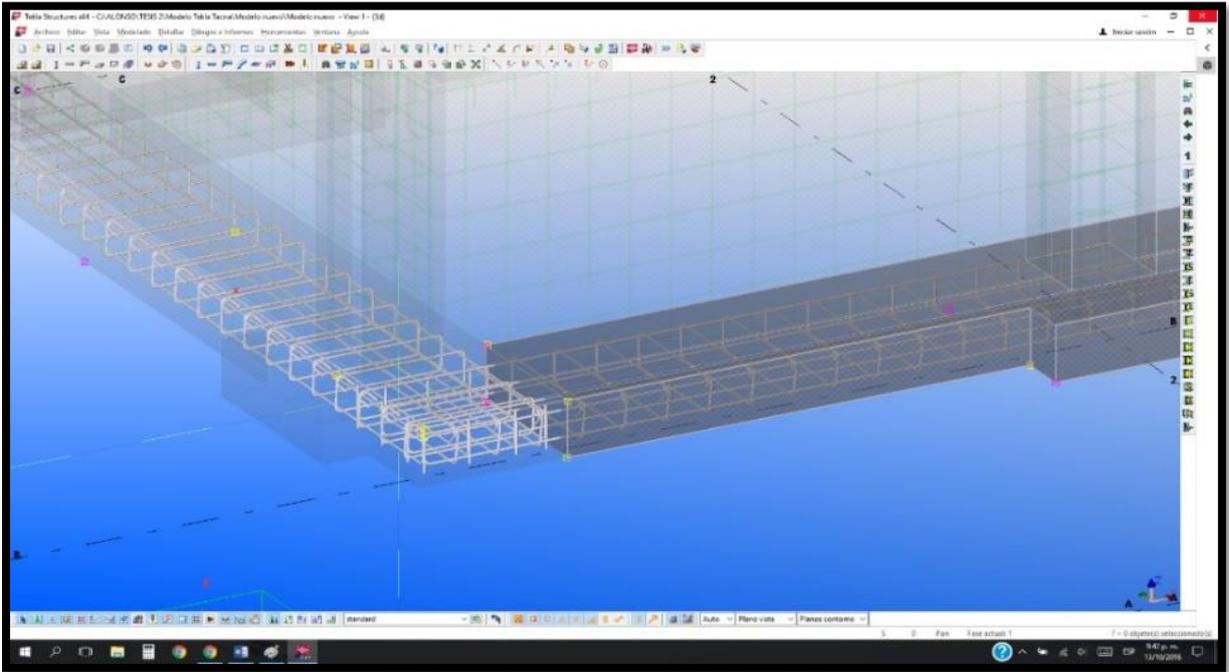


Figura 25: Acero de refuerzo en cimentaciones (fuente propia)

Fase 7

Después, procedemos a realizar los muros de contención siguiendo el mismo procedimiento. Por ello, utilizamos el comando “Crear panel de hormigón” y a continuación agregamos las propiedades necesarias. De igual manera, se modela el acero de refuerzo longitudinal y transversal. Con el mismo comando se procede a realizar el cimiento corrido del área de oficinas ubicadas en la zona central del proyecto.

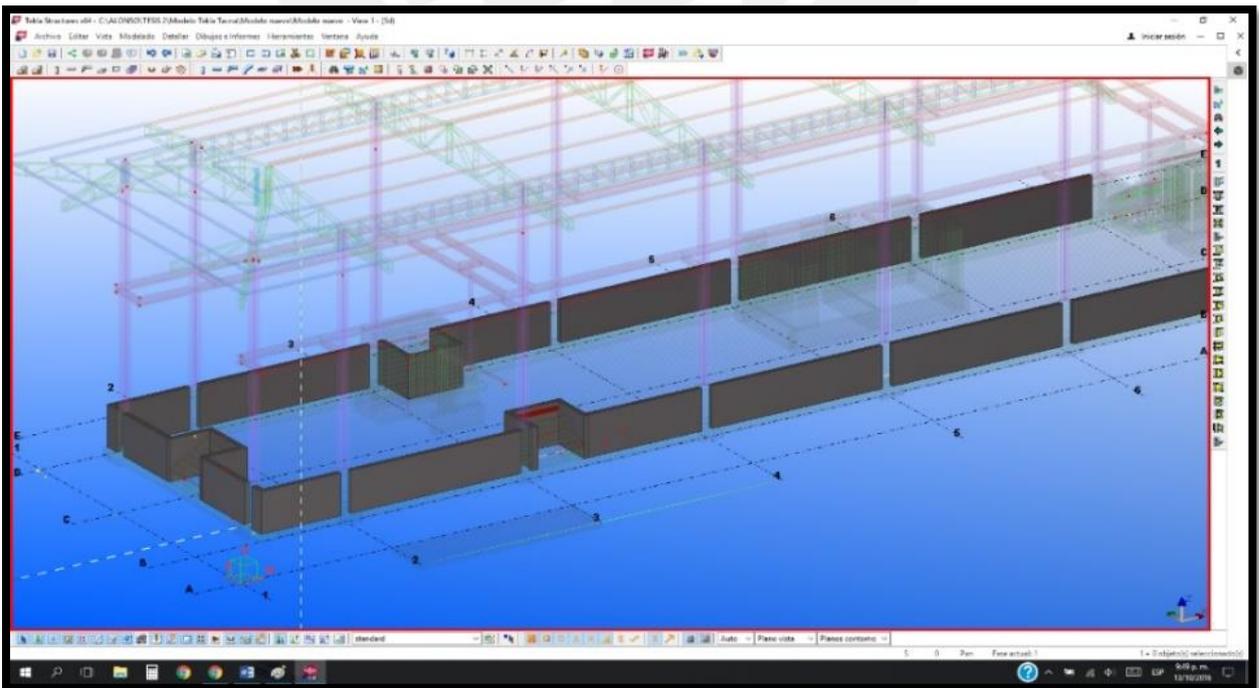


Figura 26: Modelamiento de muros de contención con acero de refuerzo (fuente propia)

Fase 8

En este momento se procede con el modelado de las columnas pedestales de concreto que serán aquellas que conecten los muros de contención y serán la base de las futuras columnas metálicas de la nave industrial. A dichos elementos se les añade el acero de refuerzo respectivo verificando que los estribos cumplan con la distribución determinada.

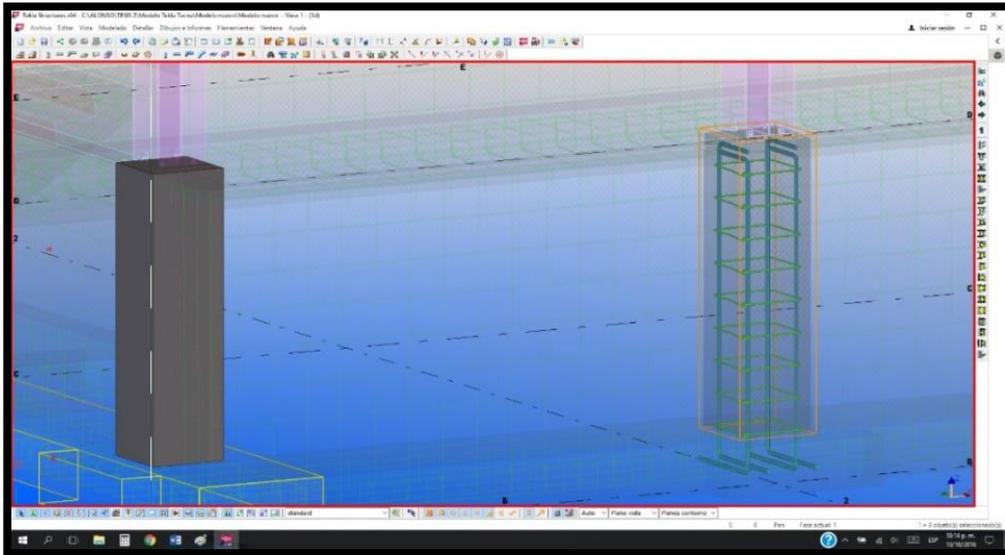


Figura 27: Modelado de columnas con acero de refuerzo (fuente propia)

Fase 9

A continuación, agregamos la primera componente del modelo, esta será el uso de una escalera en las posiciones deseadas. En este caso ingresamos al comando “Abrir base de datos componentes” e ingresaremos a un pequeño buscador de componentes posibles requeridos. En este buscador encontramos la escalera de concreto y la introducimos al modelo indicando el punto de inicio, el punto de fin y los objetos a los cuales estará conectada la misma. En esta etapa es posible seleccionar una componente a la cual se le pueda agregar el acero de refuerzo independientemente o aquella en la cual la componente este configurada para determinar el acero requerido dentro de las propiedades de configuración. En esta componente se permite diseñar las dimensiones de paso, contrapaso, ancho, inclinación de los elementos, plataformas, etc.

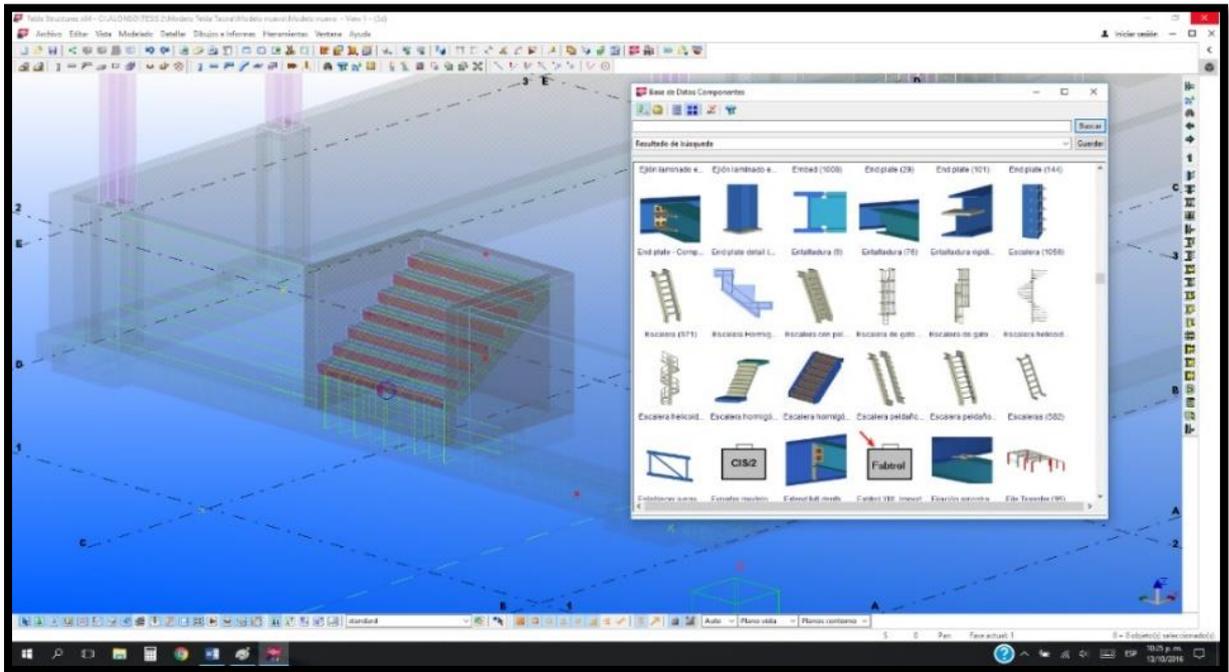


Figura 28: Escaleras a través de componentes en Tekla Structures 21.1 (fuente propia)

Fase 10

Se concluye la etapa de cimentaciones colocando una losa de 0.10 m en el área delimitada por los muros de contención. Una vez modelada la losa se procede a modelar las placas de concreto de las oficinas y las escaleras de las mismas editándolas de la misma manera que los anteriores elementos, con lo cual los elementos de concreto se dan por finalizados en el desarrollo del modelo Tekla Structures 21.1

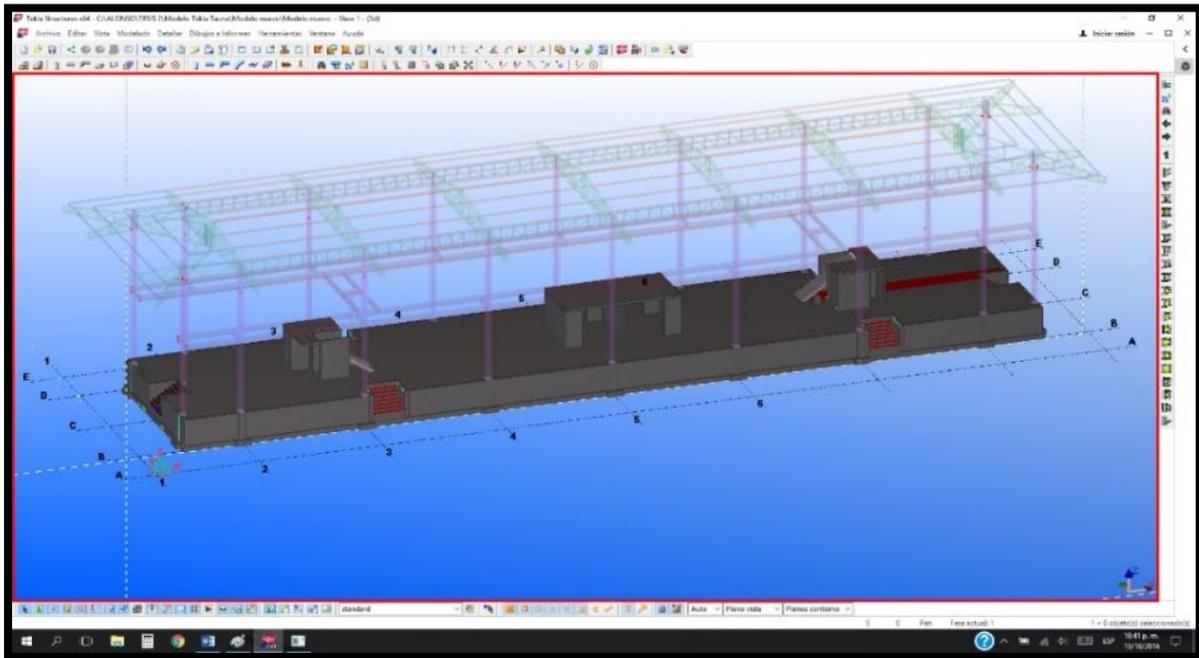


Figura 29: Estructuras de concreto concluidas (fuente propia)

Fase 11

Iniciamos la etapa de estructuras metálicas a través del comando “Crear columna”. Insertamos las columnas metálicas de sección W12x65 y W 6x15 en las posiciones deseadas apoyándonos del plano de columnas que insertamos al modelo para usar de referencia. Una vez ubicadas en el modelo se procede a editar las propiedades de las mismas de tal forma de asignarle un nombre, tipo de material, sección y posición.

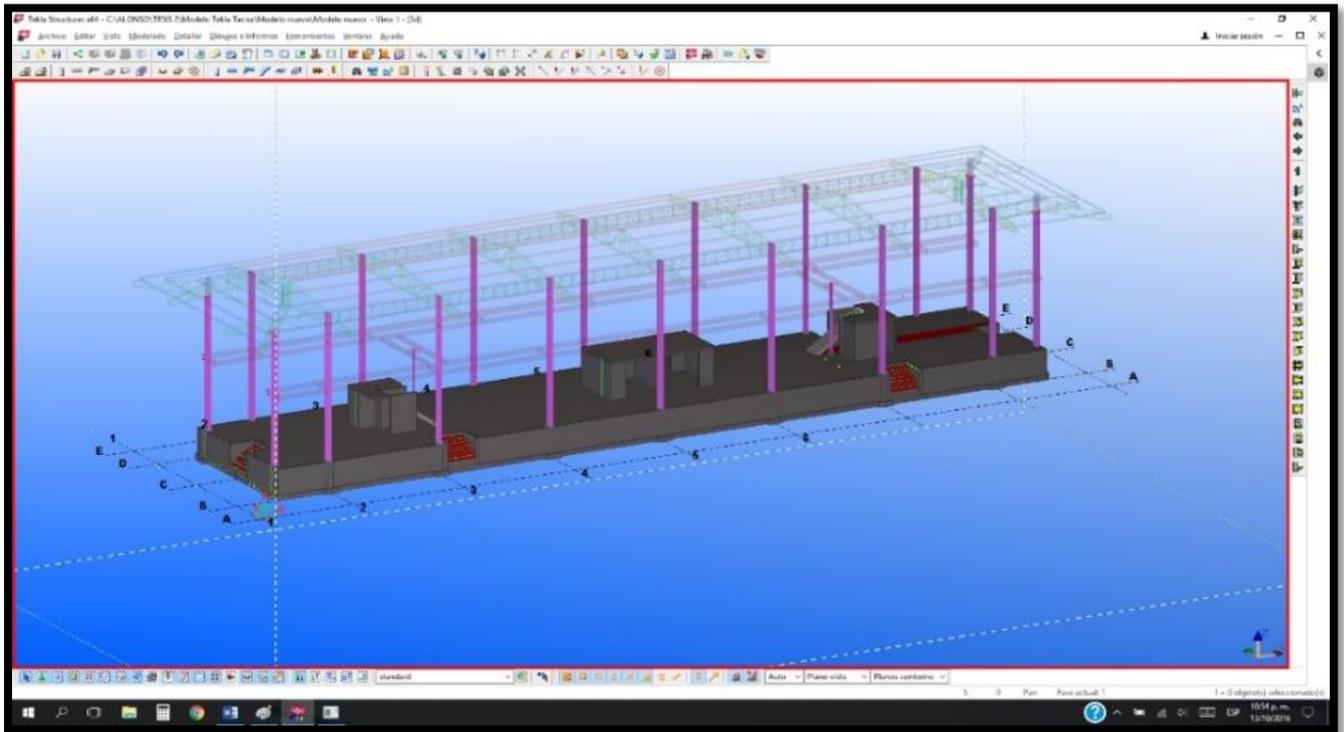


Figura 30: Columnas metálicas (fuente propia)

Fase 12

En seguida, procedemos a modelar la plataforma del proyecto la cual está conformada por vigas H de sección W12x35 en su totalidad. Para ello, hacemos uso del comando “Crear viga” para definir la longitud de cada uno de los elementos y posteriormente editarlos de la misma manera que las columnas anteriormente descritas.

Es importante mencionar en este punto, que se puede hacer uso de los comandos “Copiar” y “copiar especial” para simplificar el modelado de elementos simétricos o que se repiten en distintas posiciones.

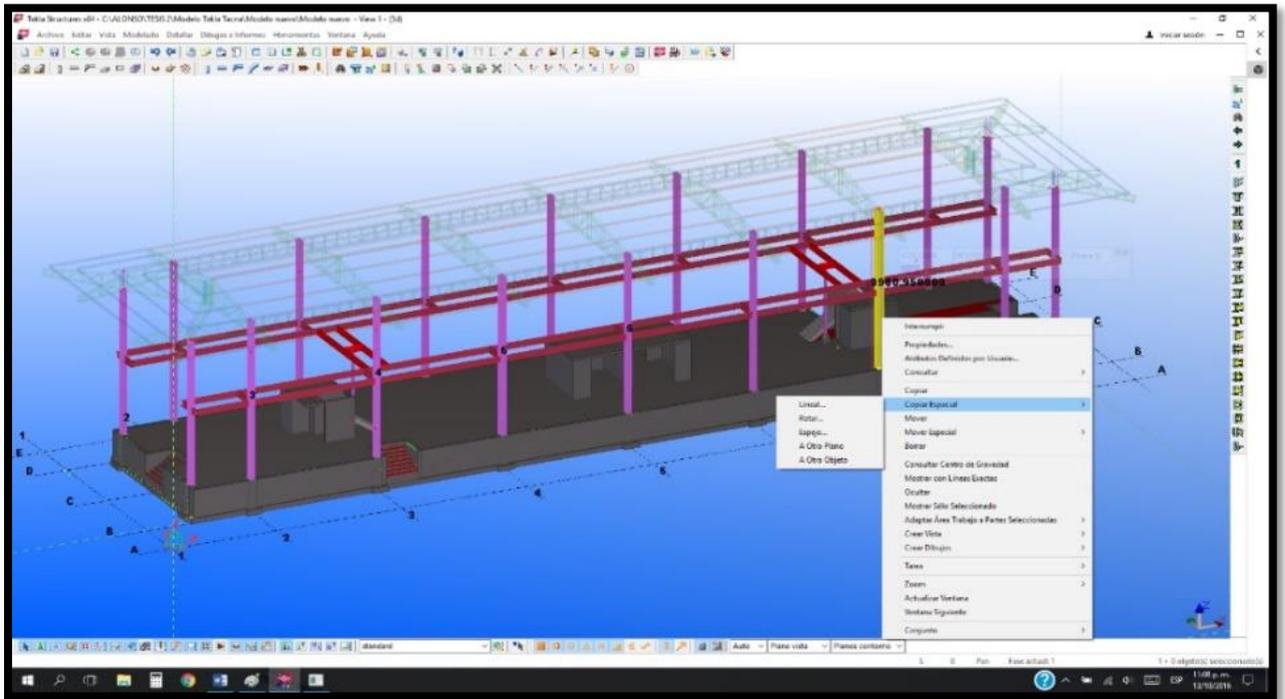


Figura 31: Plataforma en nave industrial y comando “Copiar especial” (fuente propia)

Fase 13

Se inicia el modelado de los diferentes tipos de tijerales presentes, los cuales están conformados en su totalidad por ángulos de distintas dimensiones y espesores. Para ello, se introdujo el plano 2D de los elementos para a partir de estos trazar las dimensiones exactas según lo proporcionado. De tal manera que se obtuvo el armado inicial de cada tipo de tijeral previo a incorporarle componentes, conexiones, pernos o soldadura.

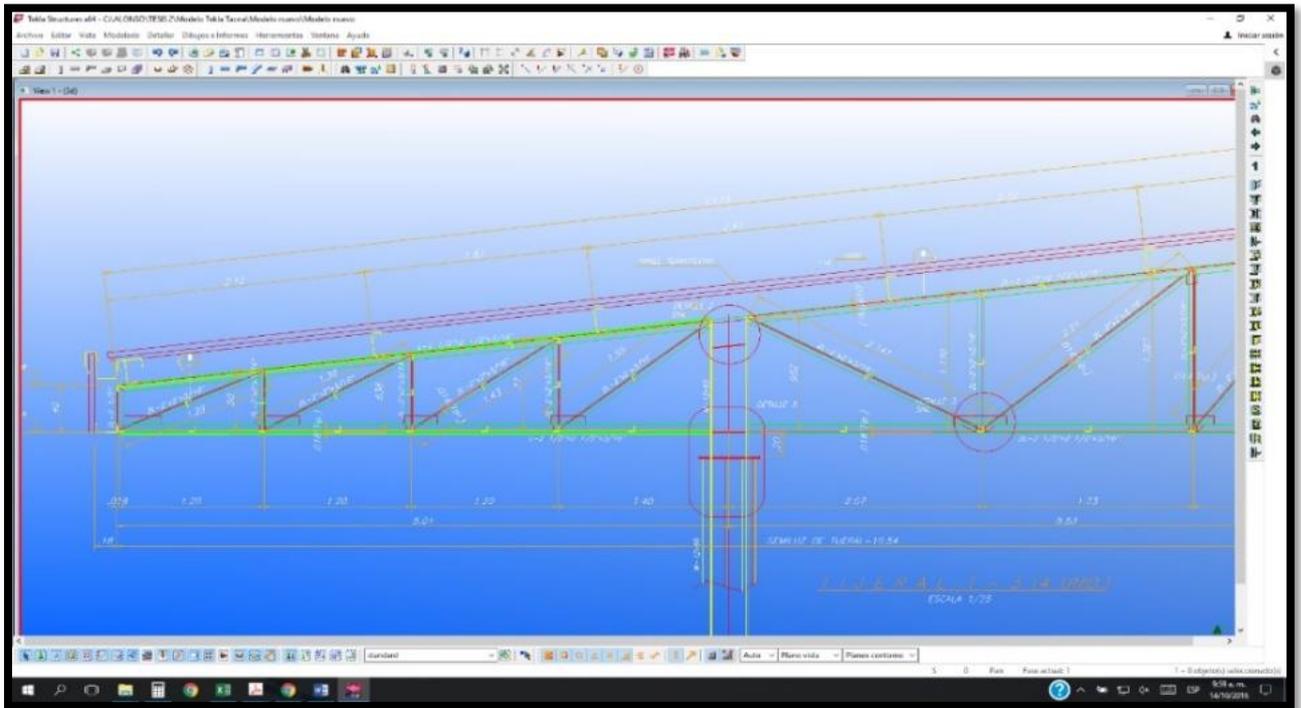


Figura 32: Modelado de elementos de tijeral (fuente propia)

Fase 14

Una vez que se concluyó con el modelado de las piezas independientes de cada tijeral, se procedió a realizar el tipo de conexión indicado para estos, las cuales consistían básicamente en cartelas de unión soldadas a los nudos de encuentro de los elementos. En este proceso se realizó una búsqueda de componentes hasta poder hallar la indicada, la cual fue la de tipo “Welded gusset” debido a las propiedades de edición que presentaba.

Con esta componente de conexión se unieron los elementos involucrados por la conexión misma, pero aún faltaba unir el tijeral como un único conjunto. Por tal motivo, una vez colocadas todas las cartelas necesarias en el tijeral se procedió a soldar los elementos gracias al comando “Crear soldadura entre partes”. Para comprobar su correcta ejecución podemos verificar que si seleccionamos una pieza del tijeral mientras apretamos la tecla “alt” inmediatamente todo el tijeral será seleccionado.

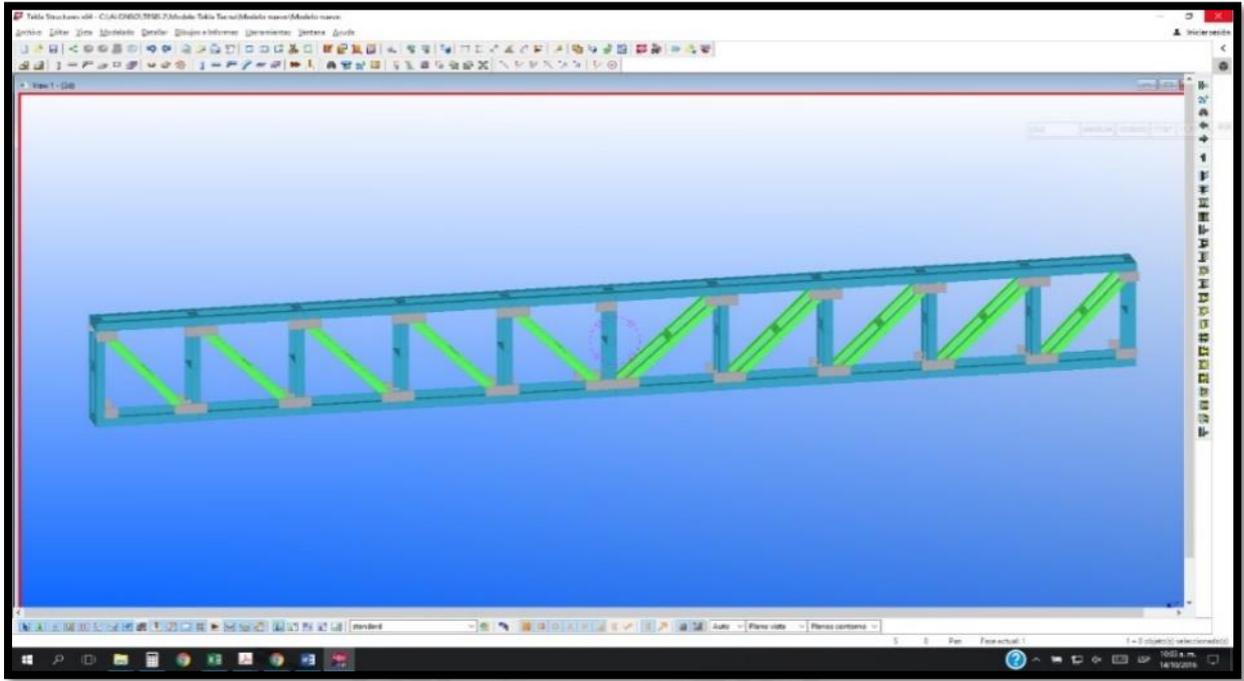


Figura 33: Cartelas de unión y soldeo de elementos (fuente propia)

Fase 15

Procedemos a ensamblar y ubicar las partes necesarias en sus posiciones finales, respetando las alturas de diseño consideradas. De tal manera de modelar la nave industrial final según los planos proporcionados.

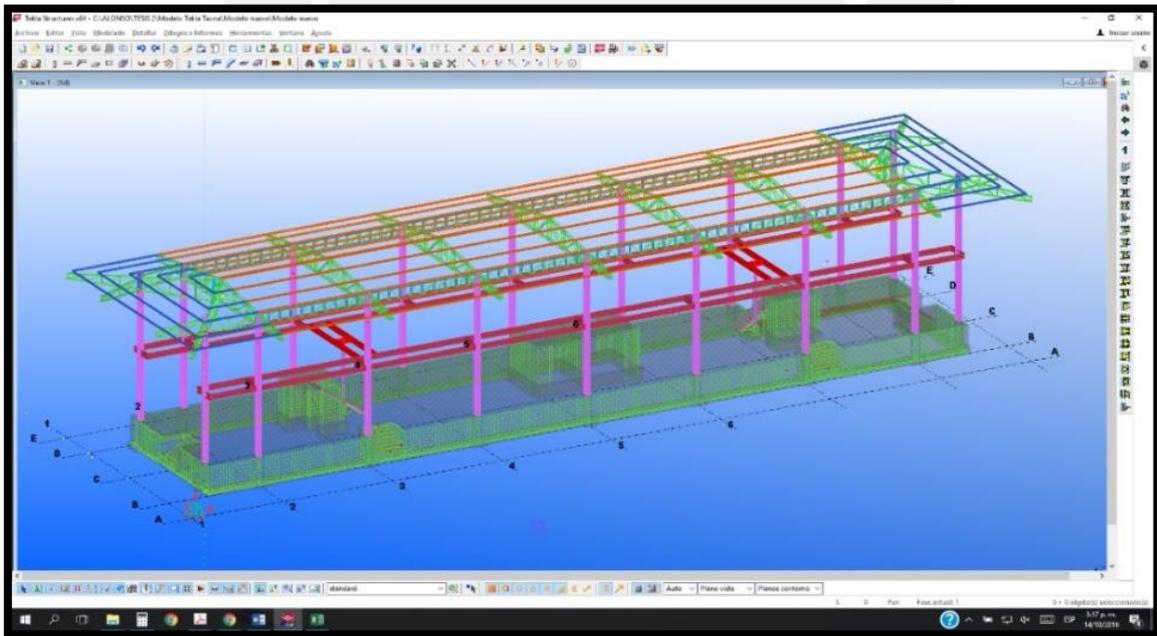


Figura 34: Ubicación final de todos los elementos (fuente propia)

Una vez que se han colocado y verificado los elementos en sus correspondientes ubicaciones, procedemos a modelar las conexiones adicionales necesarias para el modelo como lo son las placas bases, las conexiones soldadas y empernadas. Para ello, ingresamos al buscador y seleccionamos aquellas que resulten adecuadas y coincidan con las mencionadas en el diseño.

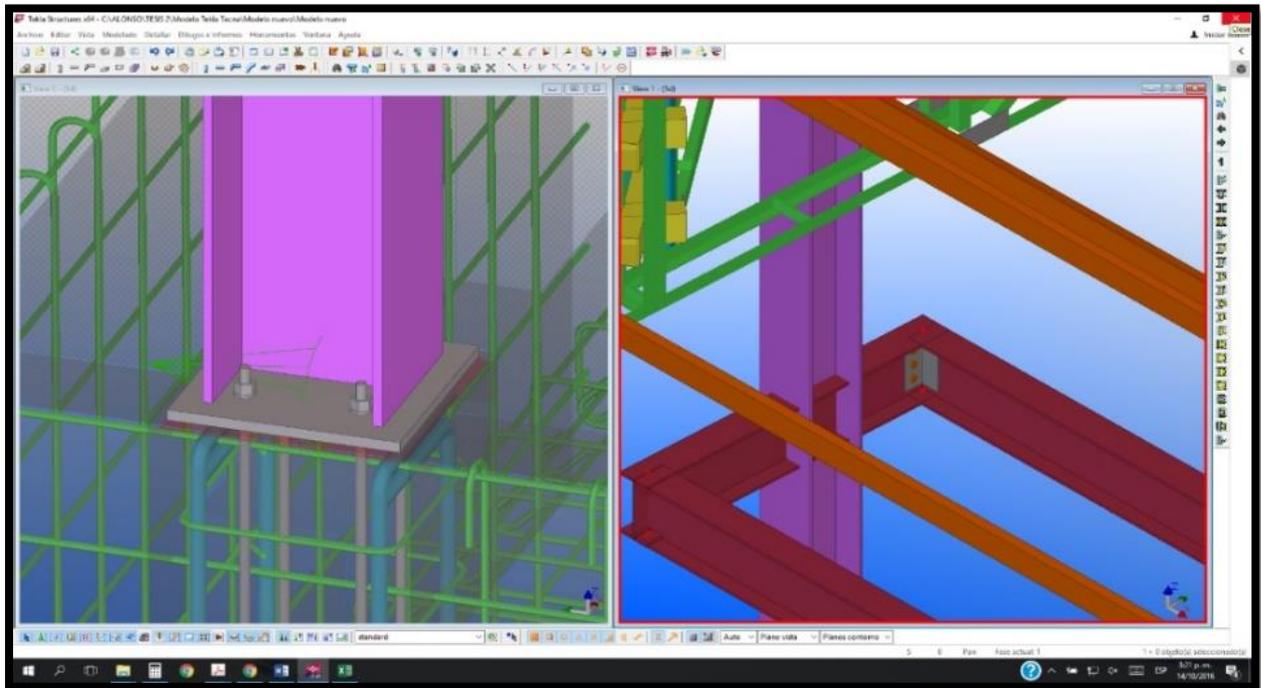


Figura 35: Conexiones en sus posiciones finales (fuente propia)

Se procede a editar cada una de estas conexiones según las especificaciones de los planos 2D, de tal manera que se incorpore al modelo los detalles deseados.

Fase 16

Finalmente se concluye el modelo en Tekla Structure 21.0 con una revisión general de lo elaborado utilizando el comando “Gestión control de choques” y dentro del cuadro de diálogo que aparece hacemos uso del comando “verificar objeto”. El cual nos indicará los elementos que están siendo interceptados, cortados, mal conectados o cualquier incompatibilidad entre elementos que sea materia de análisis para su modificación. Al seleccionar cada uno de las posibles incompatibilidades o choques el software nos indicare la ubicación del elemento y cuál es el error.

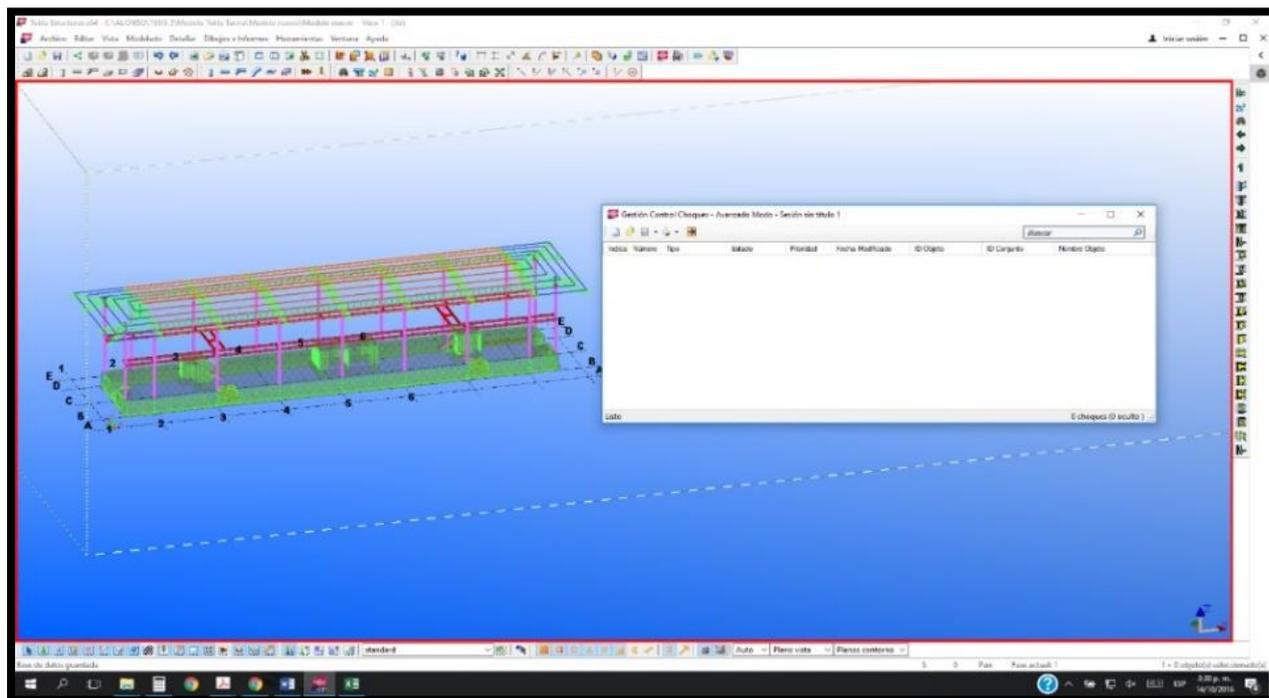


Figura 36: Verificación de choques en el modelo (fuente propia)

3.2.1.2 Incompatibilidades percibidas en AutoCAD - Tekla Structures 21.1

Las principales incompatibilidades entre los planos 2D de AutoCAD proporcionados por la empresa ejecutora del proyecto detectada en el proceso de modelado 3D fueron las siguientes:

- a) Incongruencia entre la ubicación y dimensiones de los elementos de la cimentación con respecto a la posición de las columnas.

Esta incompatibilidad es la más resaltante y determinante en el desarrollo del presente modelo, dado que las dimensiones de todos los elementos que se modelen posterior a la decisión de cual plano respetar variarán en longitud y ubicación final, por lo cual analizar y evaluar estos conflictos propios de la construcción en una etapa inicial del proyecto es

fundamental para evitar que se fabriquen elementos que luego no puedan ser montados por los motivos ya mencionados y generen pérdidas importantes relacionadas al plazo y el costo principalmente.

Para una explicación más clara y gráfica, a continuación, se presenta el plano de cimentaciones, el plano de columnas y plataforma, una superposición de estos y detalles de cerca para comprobar como las dimensiones y posiciones tanto de los cimientos, pedestales como columnas no coinciden.

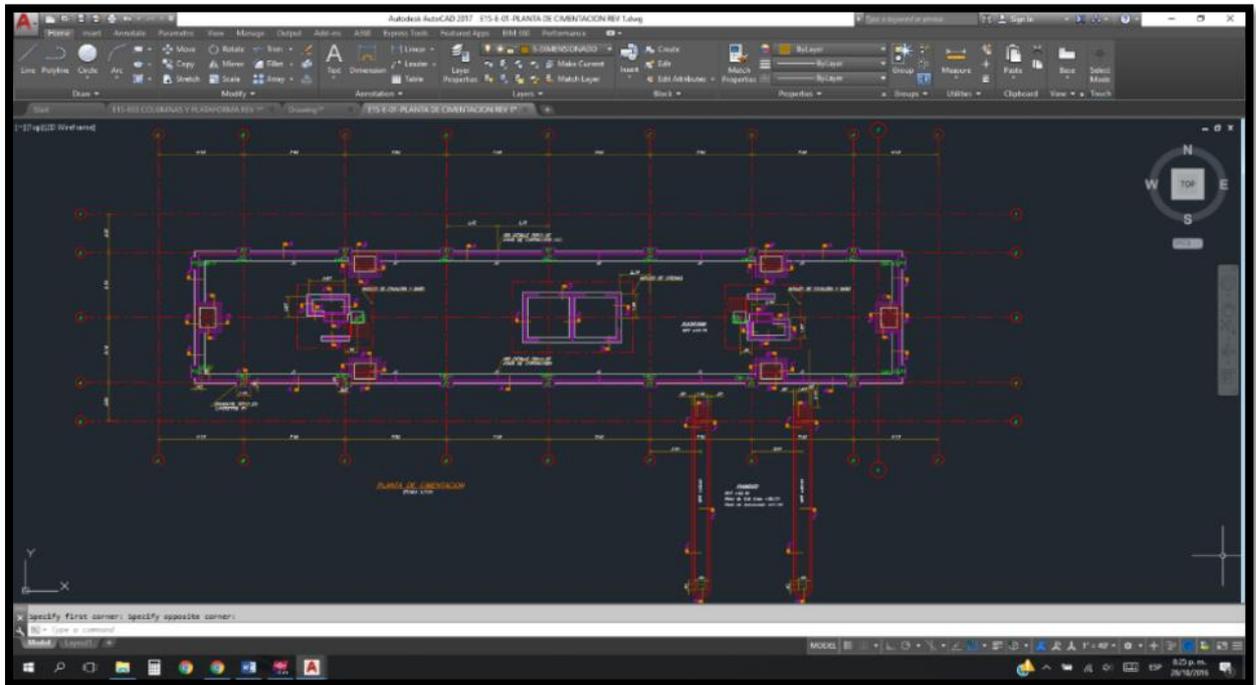


Figura 37: Plano de cimentaciones – 2D AutoCAD (Amarillo = Cimentaciones, Rojo = Columnas y plataforma) (fuente propia)

La Figura 38. Muestra tanto el plano en planta de las cimentaciones como de la plataforma superior.

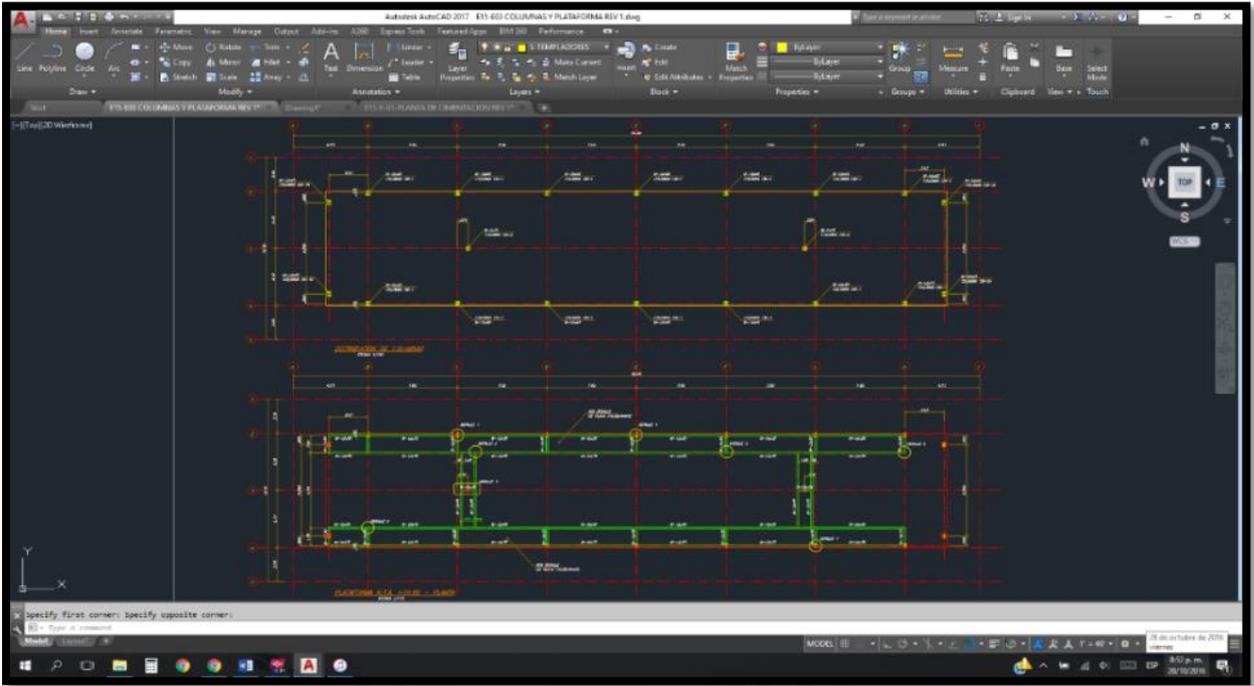


Figura 38: Plano de columnas y plataforma – 2D AutoCAD (fuente propia)

En la superposición de la Figura 39 se ha tomado como referencia el cruce de los ejes principales A-5, a partir de lo cual se pueden apreciar las diferencias más resaltantes en las posiciones de las columnas metálicas y los cimientos.

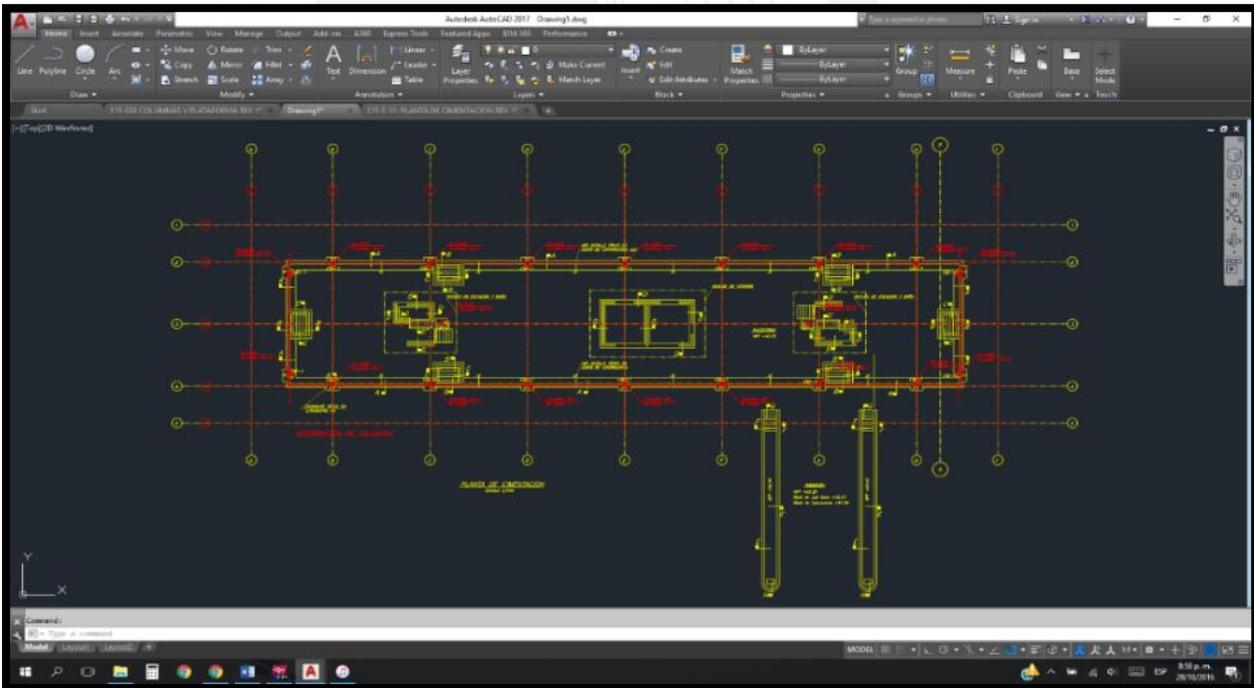


Figura 39: Superposición general (fuente propia)

A continuación, se muestran detalles para poder observar claramente las incompatibilidades entre ambos planos.

En la Figura 40 se puede apreciar como la columna tipo CM-1 próxima a los ejes A-2 del plano de cimentaciones, figura en verde, está ubicada a 0.21 m de la posición indicada en el plano de columnas.

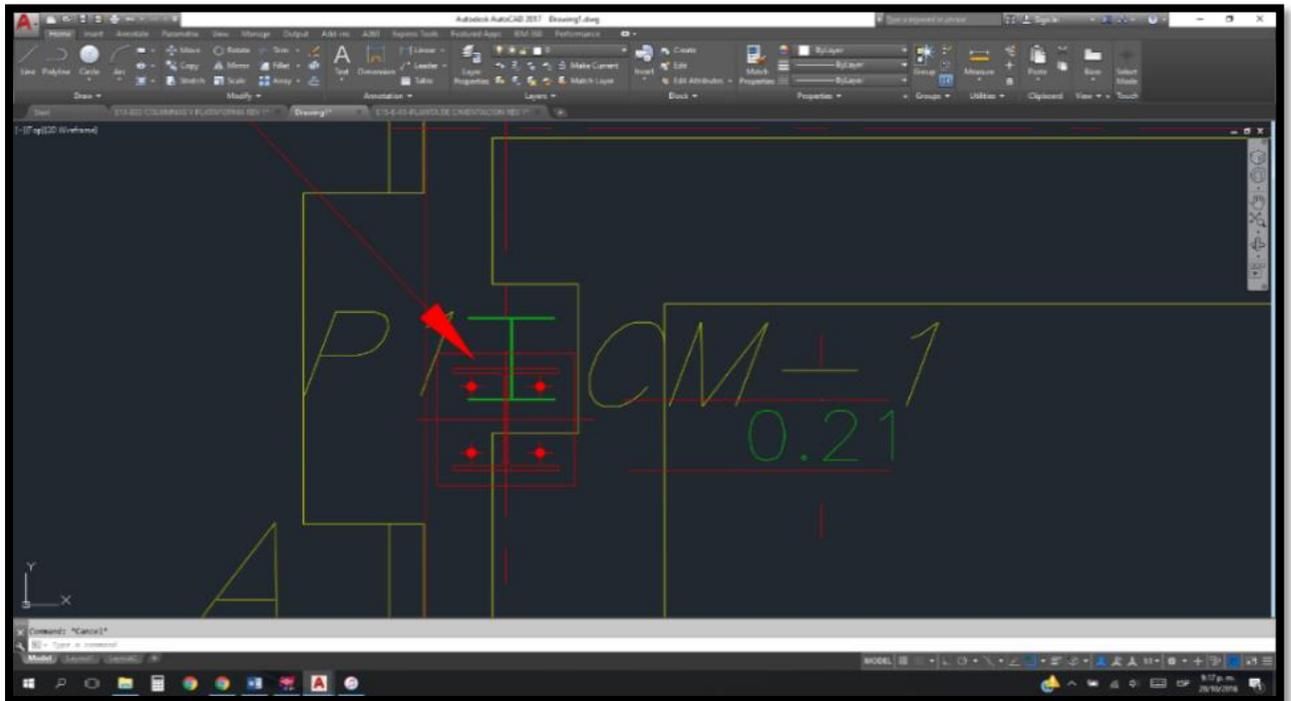


Figura 40: Desfase en posición de columna CM-1 entre planos (fuente propia)

En la Figura 41 se puede apreciar como la columna tipo CM-2 próxima a los ejes C-3 del plano de cimentaciones, figura en verde, está representada por un perfil W de dimensiones inferiores a los reales, los cuales si están representados en el plano de columnas y plataforma. Si bien en este caso el centroide de la columna CM-2 se mantiene, se puede apreciar que las dimensiones son claramente distintas y podría generar confusión sobre cuál de las dos indicaciones respetar.

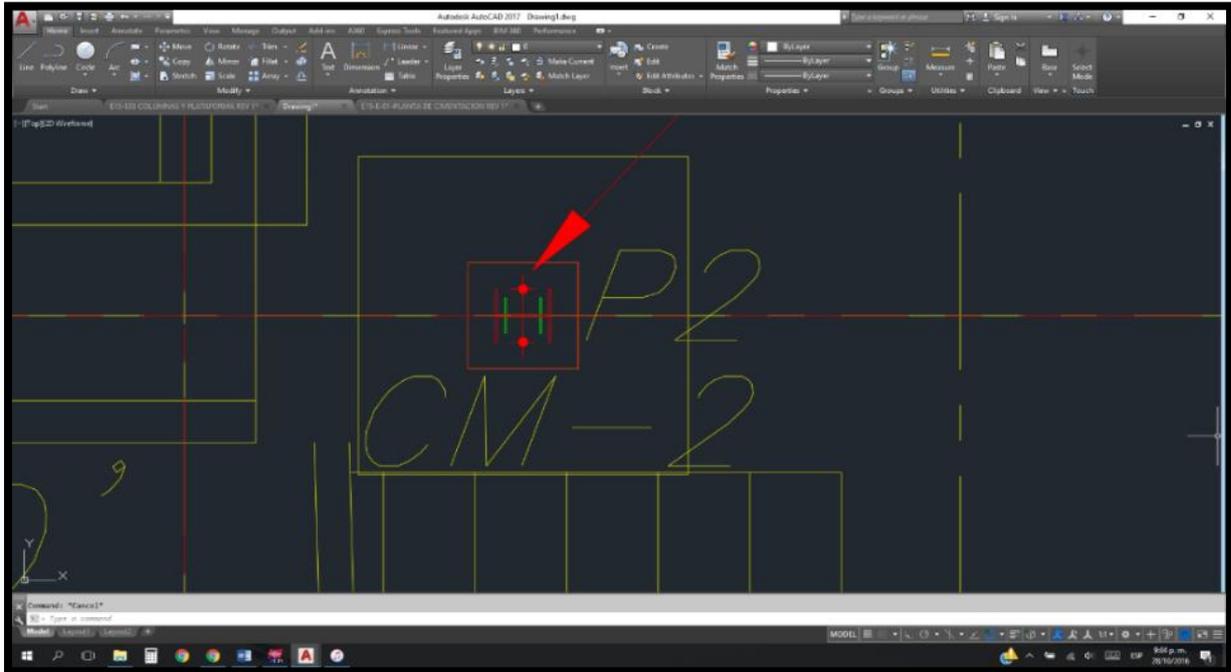


Figura 41: Desfase en posición de columna CM-2 entre planos (fuente propia)

En la solución de esta incompatibilidad se respetó la ubicación de los elementos señalada en los planos de cimentaciones y el tipo de perfil y las dimensiones de los mismos indicadas en el plano de columnas y plataforma. Esto debido a que la configuración indicada en el plano de cimentaciones resultaba seguir una linealidad y simetría tal que las columnas quedaban ubicadas en el centro del pedestal diseñado para resistir las cargas transmitidas por esta. Asimismo, dicha configuración de columnas respetaba la posición de estar centradas en las columnetas de concreto de la cimentación. La variación más representativa en términos de visualización con respecto a esta solución es el aumento en las dimensiones del perfil con respecto a las propuestas en el plano con las modeladas en Tekla Structures 21.1.

b) La altura final de los elementos no guarda proporcionalidad con el uso deseado, como es el caso de la plataforma

Según los planos de cimentaciones el nivel de piso terminado de la losa de la estructura metálica está a nivel +93.75; por lo tanto, las columnas metálicas nacen de ese nivel y tendrán una altura de 10.00 m. con lo cual llegan a la cota +103.75 y cumplen con la cota indicada en los planos correspondiente a la posición final de la brida inferior (+103.18) y superior (+103.58) de los tijerales reticulados.

En dicho contexto, durante el modelado de la plataforma se detectó que si se ubica dicho elemento respetando la cota de +99.85 indicada en los planos de columnas y plataforma, este quedaría a una altura demasiado alta para poder acceder dado que las escaleras de

acceso tendrían que tener una pendiente muy pronunciada y demasiados escalones, ya que la altura entre el nivel inferior de la escalera de acceso a la plataforma, ubicada en el techo de las oficinas, se ubica en la cota +96.3 y el ala superior de la viga transversal de la plataforma, ubicada en la cota +100.15, sería de 3.85 m lo cual es excesivo para un separación de 1.70 m.

Como solución a este problema se optó por ubicar las vigas que conforman la plataforma en la cota +98.35 de tal forma que se obtenga una altura de 2.05m. entre el inicio y fin de la escalera de acceso a la plataforma. Por lo que se varió la cota de diseño en 1.5m.

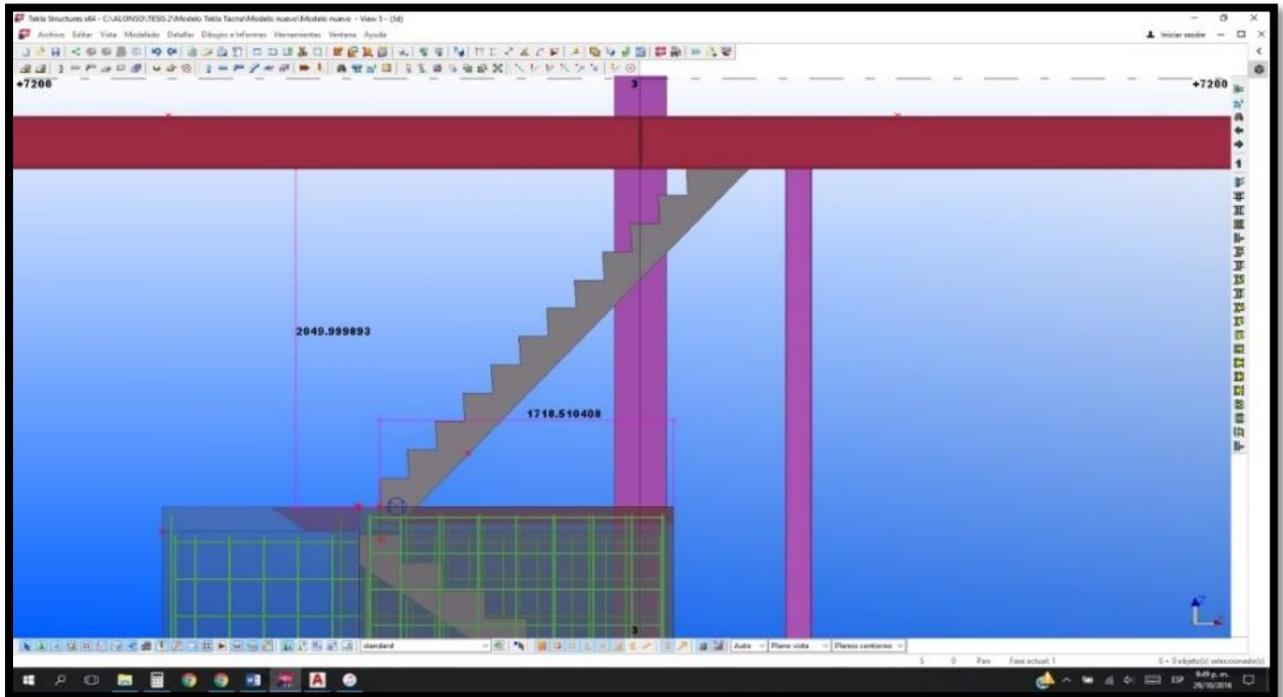


Figura 42: Escalera de acceso a plataforma reubicada (fuente propia)

c) Posición de los empalmes de columnas

Como se respetó la posición de las columnas de acuerdo al plano de cimentaciones, se aprecia un desfase en el empalme de las columnas donde se apoyan los tijerales T-3 y T-4 en diagonal correspondientes a los volados del techo (Frente frontal y posterior).

Para resolver esta incompatibilidad se respetó la linealidad de la columna ya modelada, debido a que esta si respetaba la ubicación de la placa base correspondiente y mantenía la configuración de los elementos según lo deseado.

En la Figura 43 se aprecia como la posición del empalme de columna definido dista ligeramente del propuesto en los planos de tijerales proporcionados.

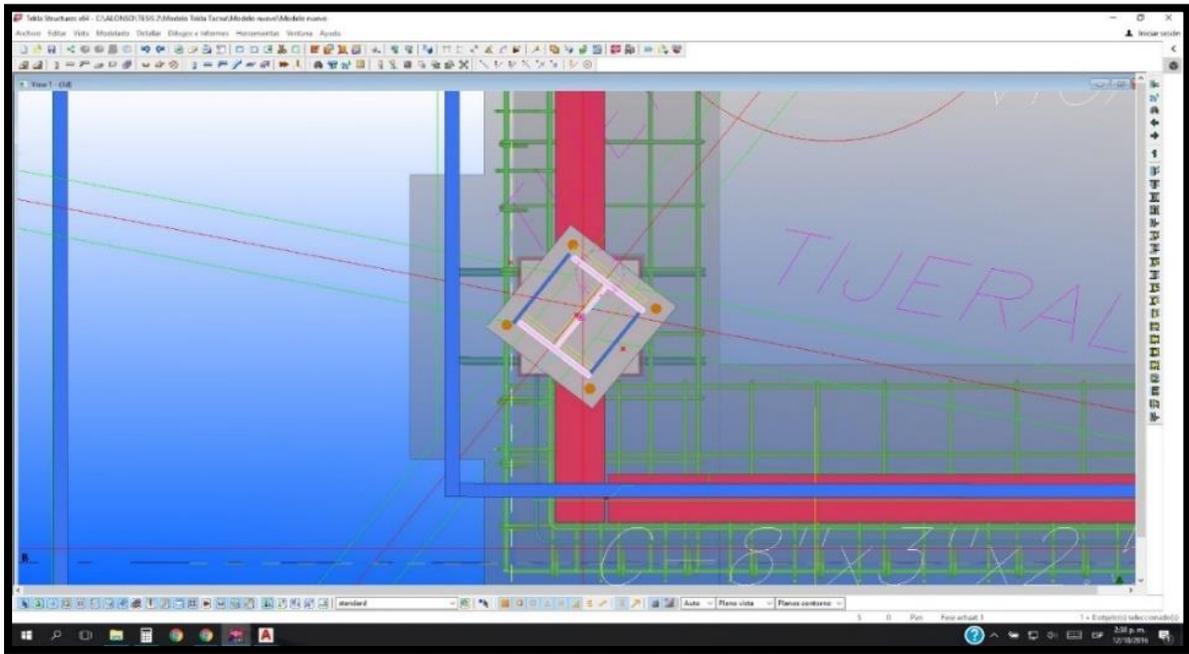


Figura 43: Desfase en empalme de columna (fuente propia)

d) Continuidad ficticia en tijerales

En la misma posición de la incompatibilidad antes mencionada se aprecia en los planos 2D de AutoCAD proporcionados que se traza el recorrido de los tijerales T-3 y T-4 como líneas continuas sin tomar en consideración el ángulo necesario para que se pueda desarrollar esa configuración ni el recorrido que estas siguen. En el plano mostrado en la Figura 44 se aprecia como el dibujo no respeta la correcta ubicación de dichos tijerales, así como las conexiones que estas representan junto con la columna. Asimismo, en la Figura 45n se aprecia como en el modelado 3D no es posible poder desarrollar el posicionamiento indicado, debido a que los ángulos de giro de los empalmes de columna están alineados con el centro de la luz libre de la estructura con lo cual es imposible respetar una linealidad en ambos tijerales.

Como solución a este problema se mantuvo la linealidad del tijeral T-3 debido a que por sus dimensiones se considera como un elemento de mayor importancia que los tijerales T-4, los cuales fueron desfasados ligeramente entre sí y cortados según la inclinación de la conexión considerada.

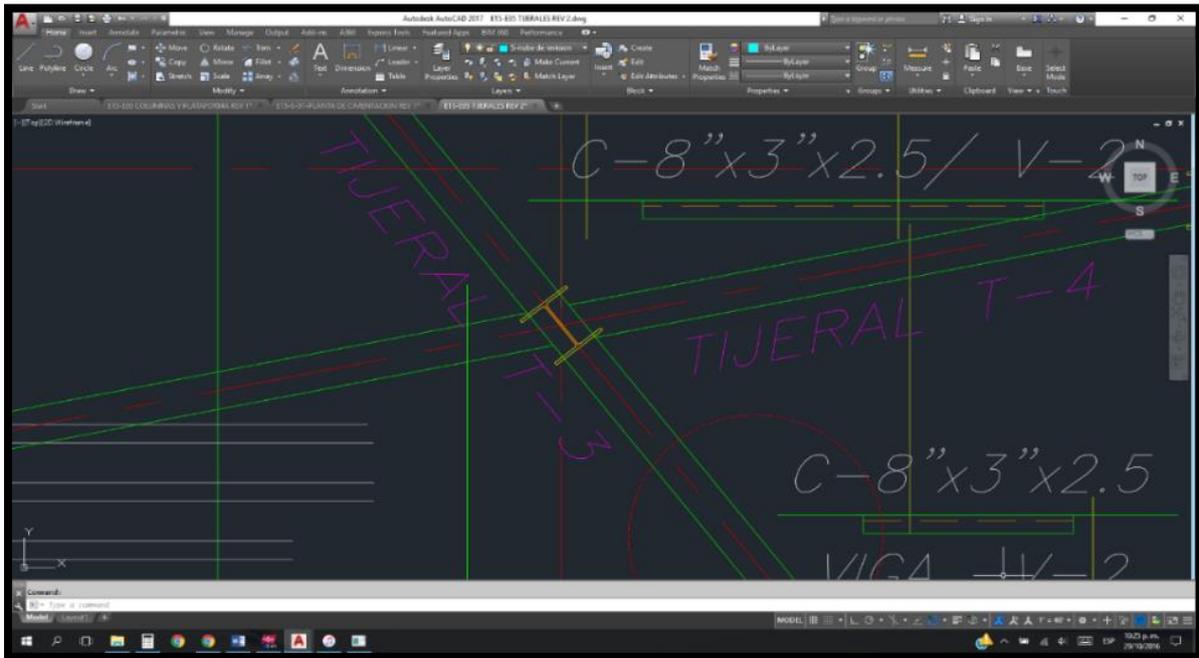


Figura 44: Linealidad errónea de tijerales en planos 2D (fuente propia)

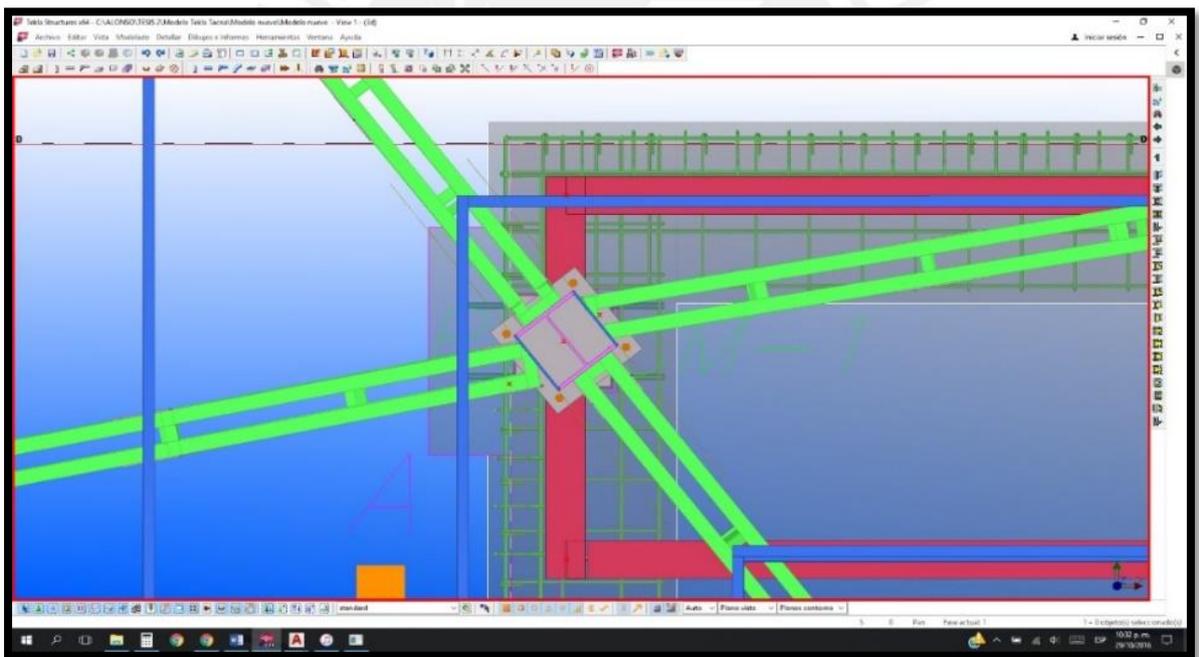


Figura 45: Linealidad errónea de tijerales en planos 2D (fuente propia)

e) Escaleras no ejecutadas en campo

La incompatibilidad presentada a continuación se origina producto de una decisión en campo de no ejecutar las cuatro escaleras de acceso hacia la superficie del edificio de inspección visual propuestas en los planos de detalle. Con lo cual, se mantuvo únicamente las dos escaleras ubicadas en el frontis y en la zona posterior del edificio.

Debido a que esta decisión fue tomada in situ, el modelo realizado sí contempla las escaleras proyectadas en planos con el fin de evidenciar la incompatibilidad antes descrita.

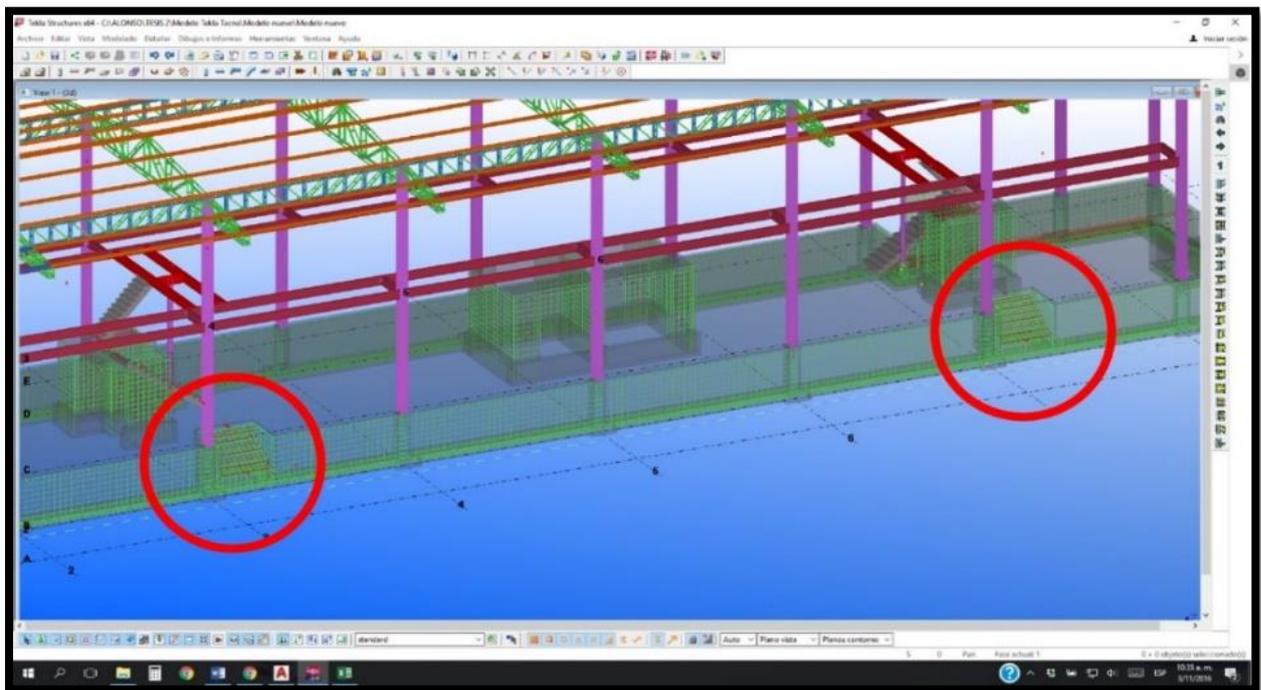


Figura 46: Escaleras no ejecutadas in situ (fuente propia)

f) Detalles incompletos en las uniones emperradas en pasarela

Gracias a las entrevistas realizadas a personal participe de la ejecución del proyecto en mención, se pudo constatar que las conexiones emperradas mencionadas en los detalles 2 y 3 de los planos en AutoCAD no son completamente reales a como se ejecutaron las mismas.

La principal diferencia radica en que todas las conexiones de este tipo no eran simples, por el contrario, eran dobles; es decir, a cada lado del alma del perfil W 12x35 que llegaba a la otra viga, generando la conexión, se colocaba un ángulo de 4"x4"x1/4" junto con 3 pernos correspondientes según la alineación indicada.

Para corroborar la información brindada también se hizo uso de fotografías proporcionadas por la empresa ejecutora MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C., donde se pudo apreciar que efectivamente las conexiones realizadas eran dobles.

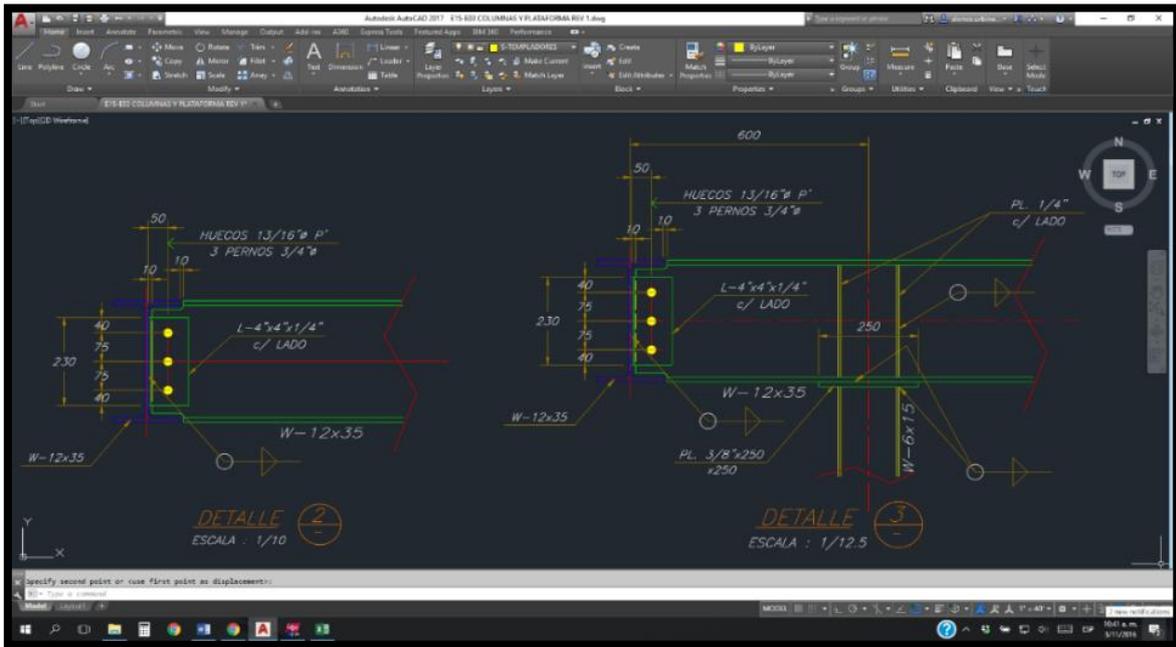


Figura 47: Detalles incompletos de unión emperrada (fuente propia)

g) Conexión mal diseñada

La presente incompatibilidad complementa a la anterior presentada, ya que gracias al modelado en Tekla Structures 21.1 Niveles típicos de costo y dotación de personal en una estructura genérica del ciclo de vida del proyecto (Extraído de Project Management Institute, 2013) se pudo visualizar con gran detalle la ubicación final de cada una de las conexiones suscritas en los planos proporcionados. De tal forma, se detectó que la conexión doble entre vigas W 12x35 de la pasarela no guardaban relación con las dimensiones de dicha viga.

Es decir, la conexión exterior compuesta por un ángulo de 4"x4"x 1/4" y 3 pernos alineados paralelos al alma de la viga excedía la distancia máxima para su desarrollo, ya que la longitud de cara de ángulo (4" =10 cm.) es mayor a la distancia de 7.8 cm. que hay desde el encuentro del alma de la viga perpendicular al fin de la viga transversal.

Por motivos académicos se mantuvo dicha conexión de 4"x4"x1/4" para poder apreciar con claridad las incompatibilidades presentadas.

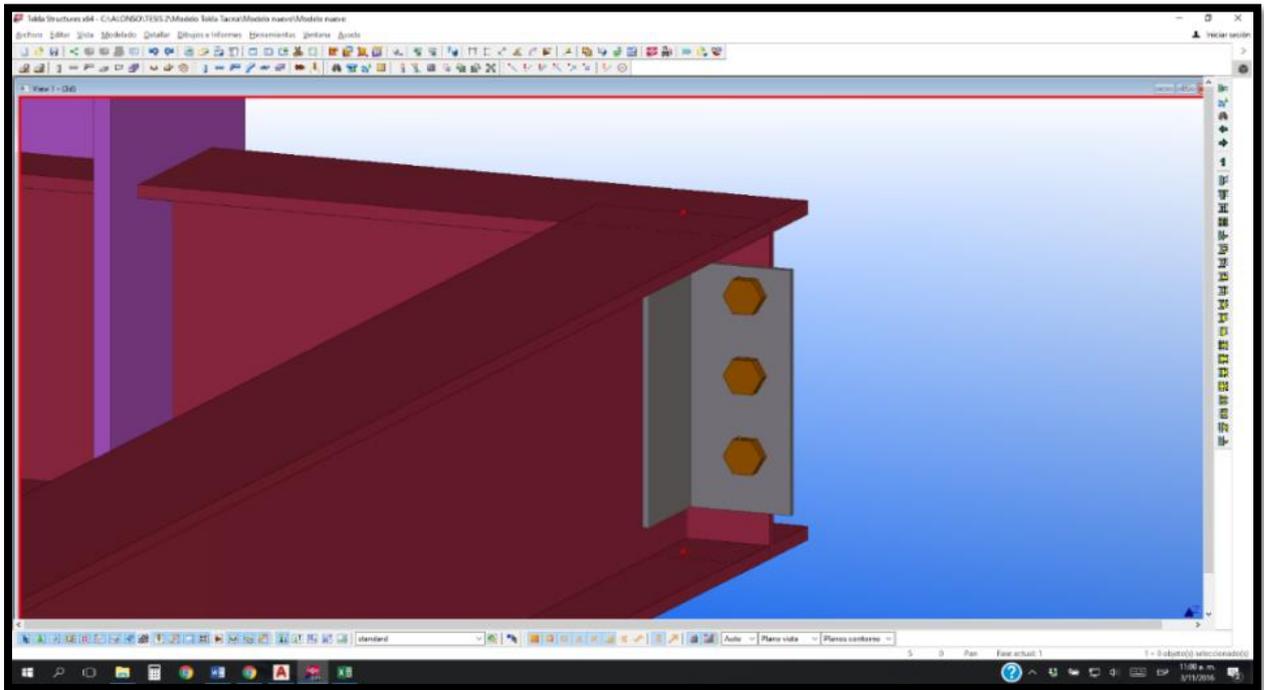


Figura 48: Conexión inadecuada (fuente propia)

h) Cambio en el empalme de tijeral T-1 y T-2

Debido a la necesidad por acelerar el proceso constructivo se rediseñó el empalme en de los tijerales T-1 y T-2, de tal forma que en el encuentro de los dos elementos simétricos se reemplazó los ángulos finales por un canal C, debido a que la junta entre estos dos elementos sería empernada para poder aumentar la productividad.

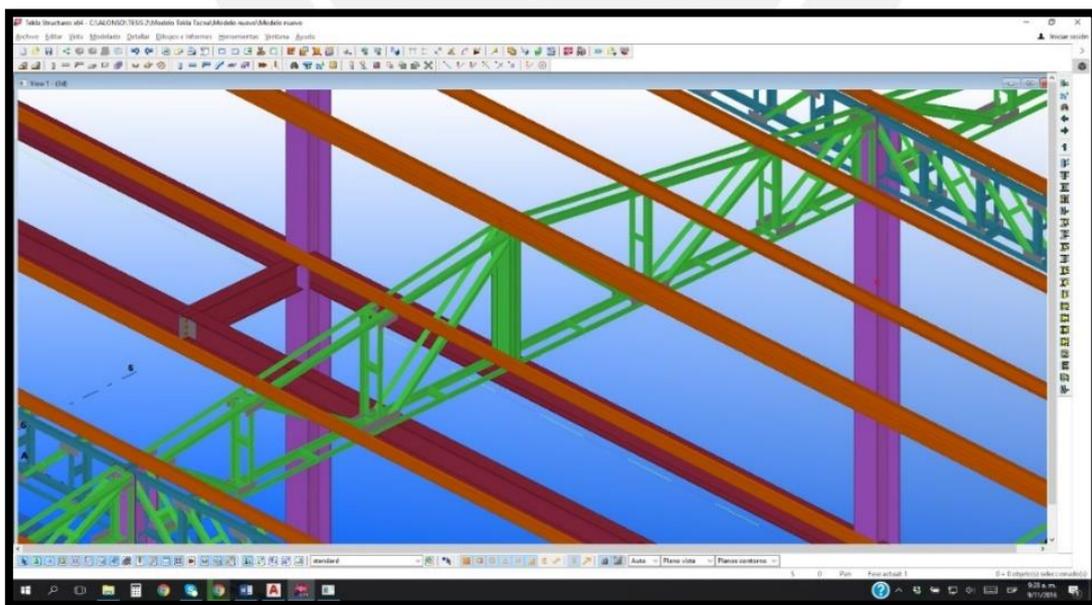


Figura 49: Cambio de elemento para facilitar empalme (fuente propia)

3.2.2 Programación mediante líneas de flujo (VICO Office R5.3)

3.2.2.1 Consideraciones para la generación de líneas de flujo

Las líneas de flujo por generar serán producto de un análisis de la configuración del proyecto, de la cantidad de recursos disponibles, de un listado y esboce de un flujo continuo de actividades y de la definición y delimitación de locaciones.

Siguiendo lo propuesto por Kenley and Seppänen (2010) en su libro, se inició la programación determinando el LBS (Location Breakdown Structure). Esta representa la organización en locaciones que se aplicarán al proyecto y las tareas involucradas en cada uno de estos. La definición de locaciones es un proceso crucial de la planificación del proyecto, debido a que afecta en la distribución de recursos, el balanceo en cantidad de tareas y variación de carga de trabajo de estas, las relaciones lógicas o de precedencia, así como la determinación logística a considerar de aquí en adelante. Posteriormente, se presentan las actividades y tareas que se analizarán en cada estudio de caso, así como las velocidades consideradas en la programación de fase. Producto de estas velocidades recopilados se generaron un número de cuadrillas conformadas por distintos trabajadores. Finalmente, se procede a revisar y levantar cualquier tipo de observaciones que se presenten en dicho flujo, se procede a elaborar las líneas de flujo correspondientes que modifican la forma en que se presenta la información y muestran como sí es posible aplicar este método de planificación y gestión a proyectos que no son repetitivos

3.2.2.2 Consideraciones del estudio de caso

En primera instancia, se analizaron diversas alternativas para definir la cantidad de locaciones y las dimensiones de cada una de estas. Tras un análisis de diferentes propuestas, se determinó que, para el proyecto no repetitivo, se considerarían 3 locaciones en planta como lo muestra la figura X, así como una distribución de la altura en 3 niveles de distintas extensiones.

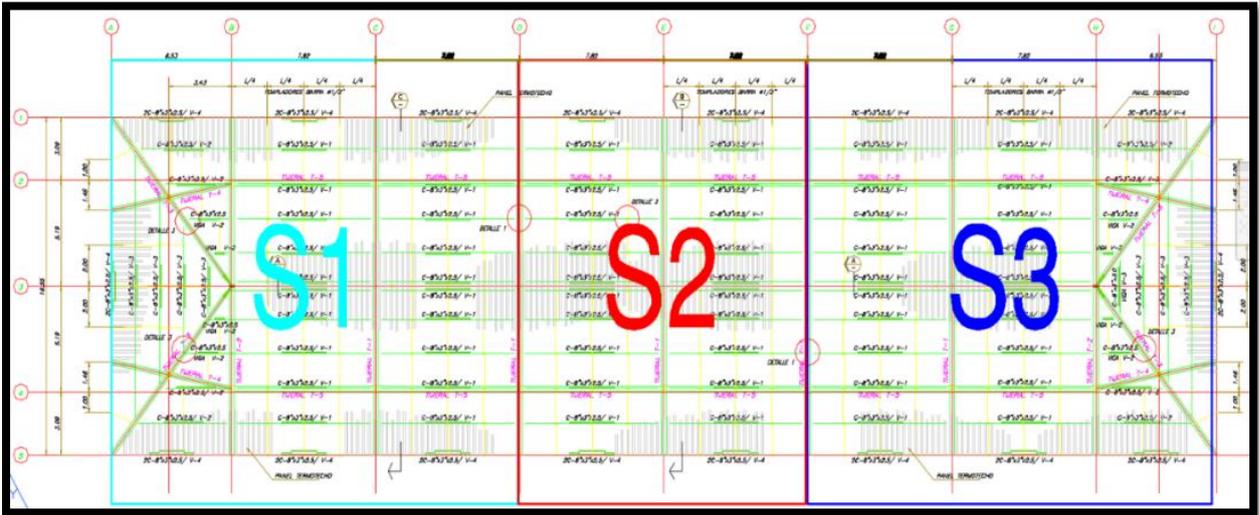


Figura 50: Sectorización de proyecto no repetitivo (Adaptado de planos de empresa MEC TEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C.)

Se determinaron 3 locaciones puesto que la carga de trabajo y las actividades que se veían involucradas en cada uno de estos, en cierta medida, podían seguir cierta repetición dentro de la cualidad de no repetitivo. Se podría establecer cierto flujo continuo de trabajo dentro de la gran variabilidad de elementos y tareas simultáneas que se debían realizar en una misma ubicación. Posteriormente, se comprobaría y verificaría que las locaciones definidas correspondían con el trabajo previsto que podía ser completado en cada una de estas y que mantenían las mismas dependencias entre tareas. Cabe resaltar que la delimitación de cada una de estas locaciones se referenció por los elementos o piezas que cada uno de estos representaba; es decir, para evitar que haya ambigüedades en la definición de los límites entre cada locación se optó por asociar un tipo y cantidad de elementos a cada locación de tal forma que una misma pieza de la estructura no quede dividida en dos locaciones diferentes.

La Tabla 3 presentada a continuación muestra las piezas que forman parte de la estructura metálica del proyecto. Asimismo, indica el tipo de elemento y la distribución de estos según cantidades en los sectores determinados.

Tabla 3: Elementos por locación (realización propia)

Locación	ELEMENTOS											
	Columnas			Placas base		Tijerales					Otros	
	CM 1	CM 1A	CM 2	Base	Unión	Tijeral T-1	Tijeral T-2	Tijeral T-3	Tijeral T-4	Tijeral T-5	Viguetas	Vigas plataforma
L1	4	2	1	7	4	1	1	2	2	4	36	20
L2	6	0	0	6	0	3	0	0	0	4	24	14
L3	4	2	1	7	4	1	1	2	2	4	36	15
Totales	14	4	2	20	8	5	2	4	4	12	96	49

A partir de lo mencionado y considerando los criterios descritos por Kenley & Seppänen (2010)(explicados en el marco teórico del presente trabajo), se obtuvo el siguiente LBS:



Figura 51: LBS del proyecto de fase de estructuras de una nave industrial (elaboración propia)

Luego de determinar las locaciones ideales para llevar a cabo el caso de estudio, se procedió a determinar y listar las actividades y tareas que se llevarían a cabo, buscando que la mayor cantidad de actividades se presente en todas las locaciones para idealizar en la medida de lo posible un flujo continuo trabajo y reducir los tiempos de esperas u holguras que puedan representar pérdidas. Asimismo, se determinó formar cuadrillas tales que se encarguen por un periodo continuo de trabajo en realizar una misma actividad, de tal forma que las tareas que deban realizar sean en mayor medida repetitivas.

En el proyecto de estructuras metálicas se priorizó distribuir las actividades en ejercicio mas no en elemento, peso o condición, ya que por ser un caso no repetitivo los elementos y cargas de trabajo no son nunca iguales, pero si el principio motor, herramientas y equipos necesarios para completar las actividades. Adicionalmente, estas actividades debían ser agrupadas o englobar actividades tales que una vez que las cuadrillas finalicen con la primera actividad asignada, estas estén en capacidad de realizar otra actividad similar con un nivel de especialidad importante para garantizar los rendimientos asumidos.

Las actividades analizadas para este tipo de proyecto una vez agrupadas adecuadamente y en orden lógico para su ejecución son presentadas a continuación:

Tabla 4: Lista final de actividades y tareas de proyecto no repetitivo (fuente propia)

Fase interna	Actividad	Tarea	Código	Velocidad	Unidad
Subestructura	Cimiento corrido muro contención	Colocación de acero de refuerzo	B	250	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	10	m3/dia
	Cimiento corrido en oficinas	Colocación de acero de refuerzo	B	200	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	10	m3/dia
	Columnas pedestales	Colocación de acero de refuerzo	B	220	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	20	m3/dia
	Zapatas para columnas C2	Colocación de acero de refuerzo	B	250	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	8	m3/dia
	Muro de contención	Colocación de acero de refuerzo	B	400	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	40	m3/dia
	Escaleras de ingreso	Encofrado	A	6	m2/dia
		Colocación de acero de refuerzo	B	250	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	40	m3/dia
	Losa principal	Encofrado	A	25	m2/dia
		Colocación de acero de refuerzo	B	400	kg/dia
Vaciado de concreto		C	40	m3/dia	
Superestructura concreto	Placas oficinas	Encofrado	A	15	m2/dia
		Colocación de acero de refuerzo	B	400	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	40	m3/dia
	Losa de techo en oficinas	Encofrado	A	25	m2/dia
		Colocación de acero de refuerzo	B	400	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	40	m3/dia
	Escaleras Oficinas	Encofrado	A	6	m2/dia
		Colocación de acero de refuerzo	B	400	kg/dia
		Vaciado de concreto	C	40	m3/dia
Superestructura metálica	Placas base	D	6	und/dia	
	Columnas metálicas	E	6	und/dia	
	Vigas de plataforma	E	7	und/dia	
Nave industrial	Tijeral 1	F	1.6	und/dia	
		E			
	Tijeral 2	F	1.6	und/dia	
		E			
	Tijeral 3	F	1.3	und/dia	
		E			
	Tijeral 4	F	1.1	und/dia	
		E			
	Tijeral 5	E	2	und/dia	
	Extensión de columna	F	6	und/dia	
Placa base	D	6	und/dia		
Viguetas	E*	65	ml/dia		

Las actividades que hacen referencia a “Tijeral 1”, “Tijeral 2”, “Tijeral 3”, “Tijeral 4” y “Tijeral 5” han sido modeladas acorde al cronograma suministrado por la empresa ejecutora. Dichas actividades representan las tareas de “armado final y soldeo”, “izaje”, “posicionamiento”, “empernado”. De igual manera, la actividad “Placa Base” involucra las tareas “Colocación y nivelación” y “Empernado – torqueo”. La actividad “Columnas metálicas” agrupa a las tareas “izaje”, “Posicionamiento” y “Soldeo a placa base”. Finalmente, la actividad “Vigas de plataforma” representa las tareas “izaje”, “Posicionamiento” y “Empernado – torqueo”.

A continuación, y acorde a lo recomendado por Seppänen, Ballard y Pesonen (2010) antes de pasar a la siguiente fase de planificación se deben considerar y estimar la cantidad de recursos necesarios para cada tarea identificada en cada locación y el rendimiento necesario para cumplir con los plazos, propuestos por el cliente o planteados en un inicio por mutuo acuerdo, en cada línea de flujo resultante. Debe tenerse en cuenta que puede haber diferentes tipos de trabajos realizados por una misma cuadrilla en una o varias ubicaciones.

Como se contaba con el cronograma ejecutado del proyecto repetitivo se consideró este como línea base y se buscó optimizar el plazo, con ello se tuvo que incrementar los recursos de mano de obra. En la programación de fase de construcción de este proyecto se obtuvieron las líneas de flujo con la consideración de los recursos críticos tales y como sucedieron en la realidad. Por ello, la consideración de una grúa en el proyecto y herramientas menores suficientes para poder cumplir con el cronograma propuesto. La determinación de la cantidad de trabajadores que hubieran sido necesarios se obtuvo gracias a la iteración de opciones en reunión con el jefe de proyecto de MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C. bajo tres factores, los cuales fueron: i) rendimiento promedio histórico por tarea, ii) rango y nivel de capacitación y iii) costo de remuneración. De tal forma, se determinó que para el proyecto en mención se hubieran podido considerar 26 trabajadores en total, de los cuales la mayoría podría participar de las actividades de estructuras de concreto armado y de estructuras metálicas. Otros recursos del proyecto fueron abastecidos adecuadamente y no afectaron el cronograma.

Adicionalmente, el alcance del proyecto de MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C. consistió en la fabricación y montaje de la estructura metálica. Sin embargo, el alcance de esta investigación abarca la estructura de concreto armado por fines académicos. Dicha información también pudo ser analizada junto con el jefe de proyecto para poder esbozar la programación que hubiera sido propuesta. Así, en las líneas de flujo finales obtenidas no se consideran los retrasos por causas no imputables a la organización.

Las cuadrillas obtenidas para la ejecución de las tareas o grupo de actividades se muestran en la Tabla 5 presentada a continuación:

Tabla 5: Conformación de cuadrillas de trabajo en proyecto no repetitivo (realización propia)

Cuadrilla	Código	Capataz estructura concreto	Capataz estructura metálica	Operario	Ayudante	Soldador/Oxigenista	Montajista
1	A	1/3	-	1	2	-	-
2	B	1/3	-	1	2	-	-
3	C	1/3	-	1	2	-	-
4	D	-	1/3	-	2	2	2
5	E	--	1/3	-	2	2	2
6	F	-	1/3	-	-	1	2

De tal forma se crean 6 tipos de cuadrillas distintas para la ejecución de las actividades. En total una cantidad de 23 trabajadores que formarán parte del proyecto.

3.2.2.3 Líneas de flujo en Vico Office

En el presente apartado se expondrá brevemente los pasos seguidos para generar las líneas de flujo del proyecto en el software Vico Office R 5.3

Fase 1

Se ingresa al software y se crea un nuevo proyecto en el botón “New Project” al cual se le asigna un nombre representativo. Una vez que el archivo creado ha cargado se procede a abrir dicho archivo con el botón “Open Project” y posteriormente se define la configuración básica del archivo en la pestaña “Define Settings”.

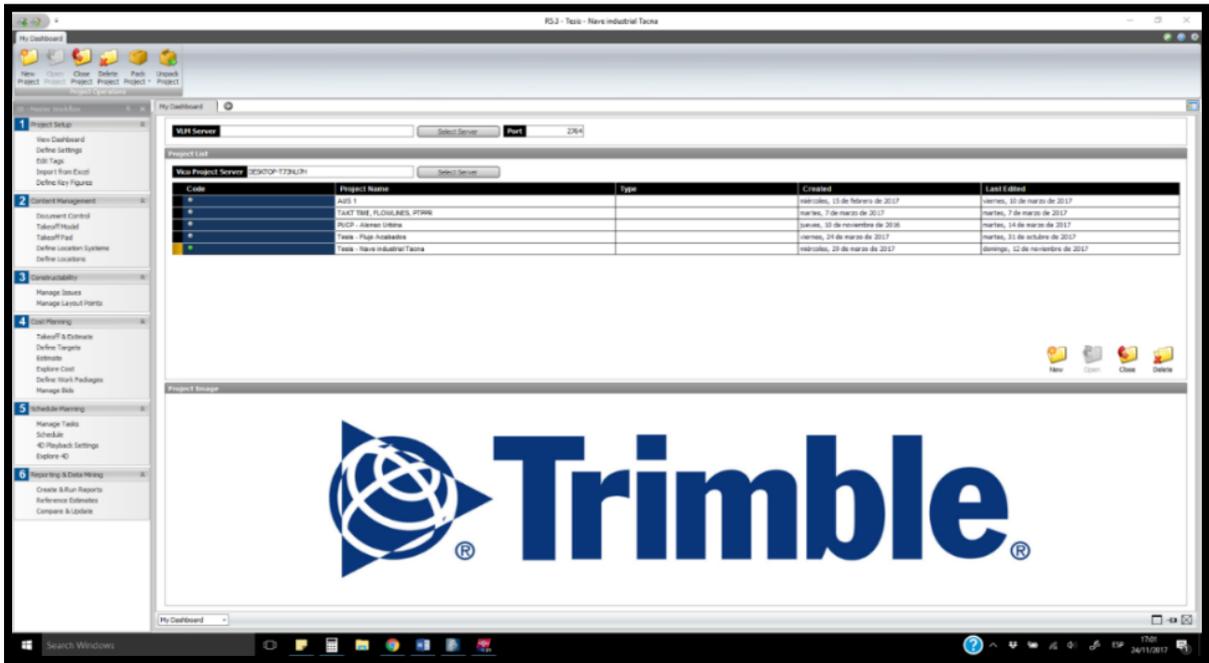


Figura 52: Interfaz de Vico Office R5.3 (fuente propia)

Fase 2

Se importa el modelo 3D del proyecto desarrollado desde el software BIM del que ha sido desarrollado, en este caso Tekla Structures 21.1 para el proyecto no repetitivo y desde Revit 2016 para el caso del proyecto repetitivo. Luego de haber importado el modelo y ya encontrarse en el archivo creado, se procede a activar dicho modelo para el reconocimiento de todos los elementos y sus metrados correspondientes. Los cuales, posteriormente, responderán a los sectores que se delimiten en el modelo. Para ello, ingresamos a la sección "Document Control" e ingresamos a la pestaña "Model Register". Luego seleccionamos el modelo que aparecerá en esa vista y presionamos la opción "Activate selected models". Si deseamos cambiar algunos parámetros de la activación podemos configurarlo a través de "Change activation options".

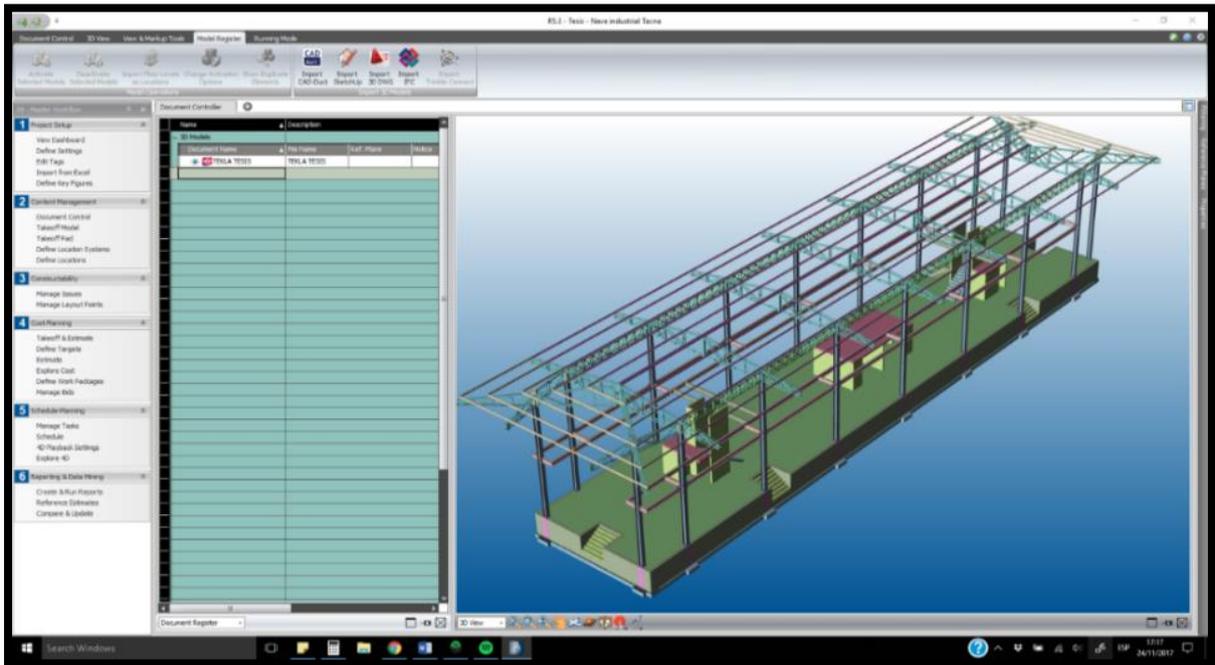


Figura 53: Activación de modelo 3D en Vico Office (fuente propia)

Fase 3

Una vez que el proyecto ya está importado en Vico Office y activado correctamente bajo los parámetros deseados pasamos a verificar si los metrados se han importado correctamente y no hay problemas en ellos. Asimismo, apreciamos el en el modelo 3D a que correspondo cada elemento que ha sido reconocido por el software. Para ello, ingresamos a la sección 2 – Content Management y a la opción “Takeoff Model”. La pantalla que se abrirá será como la presentada en la Figura 54.

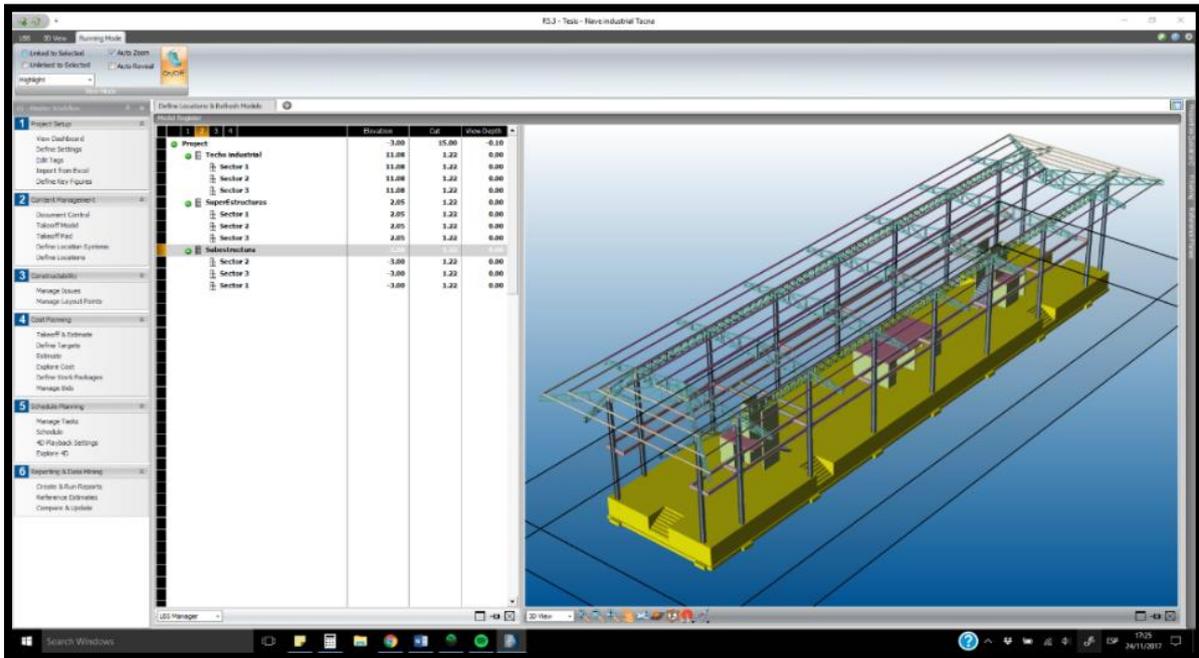


Figura 55: Metrados obtenidos del modelo 3D (fuente propia).

Fase 5

Verificado los metrados y los elementos reconocidos en el software procedemos a elaborar un esquema de presupuesto de las partidas que se desean aplicar al modelo elaborado. Por ello, ingresamos a la sección 4 – Cost Planning y opción “Estimate”. En esta pantalla podremos elaborar la estructura de las partidas y actividades a realizar, pero no se colocarán los metrados, ya que estos serán directamente vinculados con los objetos importados del modelo 3D.

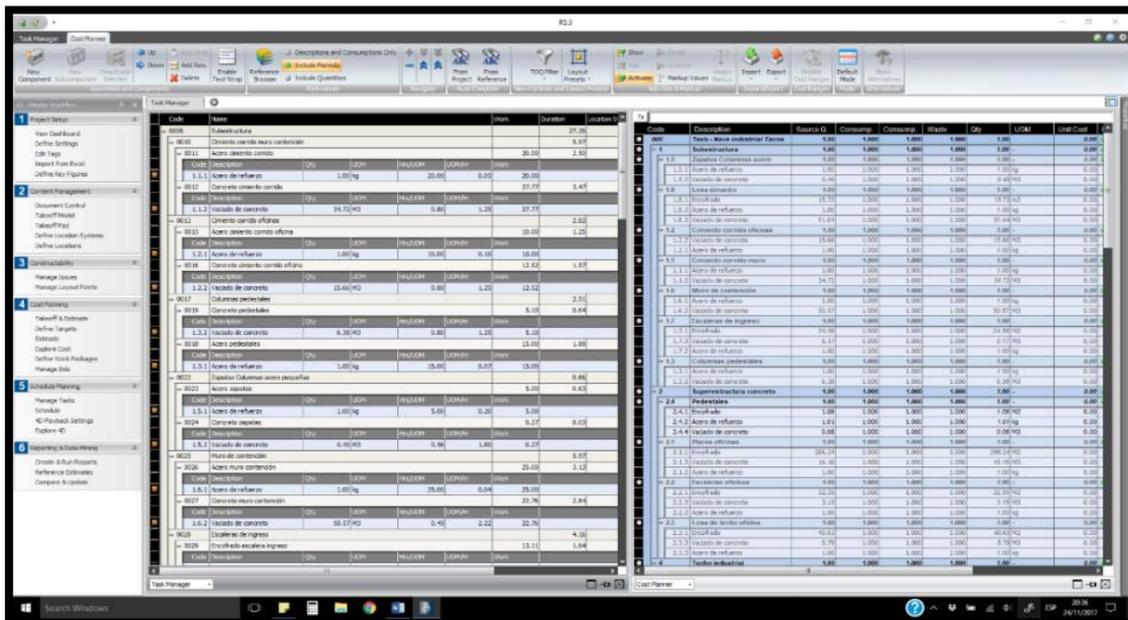


Figura 58: Generación de tareas a representar en líneas de flujo (fuente propia)

Fase 8

Cuando ya se ha completado la planificación de las tareas que serán representadas a través de las líneas de flujo, procedemos a asignarles el orden de precedencia de cada una de ellas. Esto lo realizamos ingresando la sección 5 – Schedule Planning, opción “Schedule”. Inmediatamente se abrió una nueva ventana la cual corresponde al programa Schedule Planner. Nos ubicamos sobre el menú de la barra izquierda e ingresamos a “Network View”. En ella seleccionamos los cuadrantes, que representan a las actividades, y las relacionamos con su actividad sucesora generando una flecha predecesora. De ser necesario, podemos ingresar a dicha flecha para editar alguna especificación.

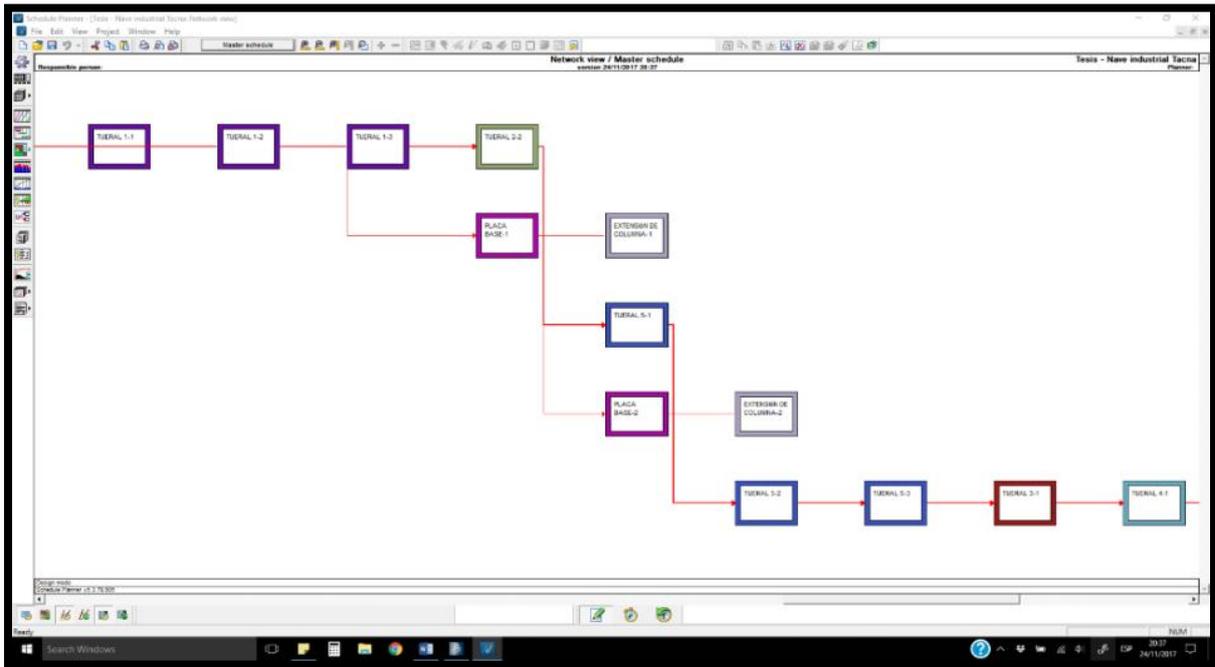


Figura 59: Definición de relaciones de precedencia (fuente propia)

Fase 9

Finalmente, cuando todas las precedencias están establecidas según lo requerido podremos apreciar las líneas de flujo resultantes ingresando a la opción “Flowline View” ubicada en la barra izquierda de menú. En esta vista podremos realizar configuraciones, generar nuevas tareas, editar la visualización, entre otras acciones.

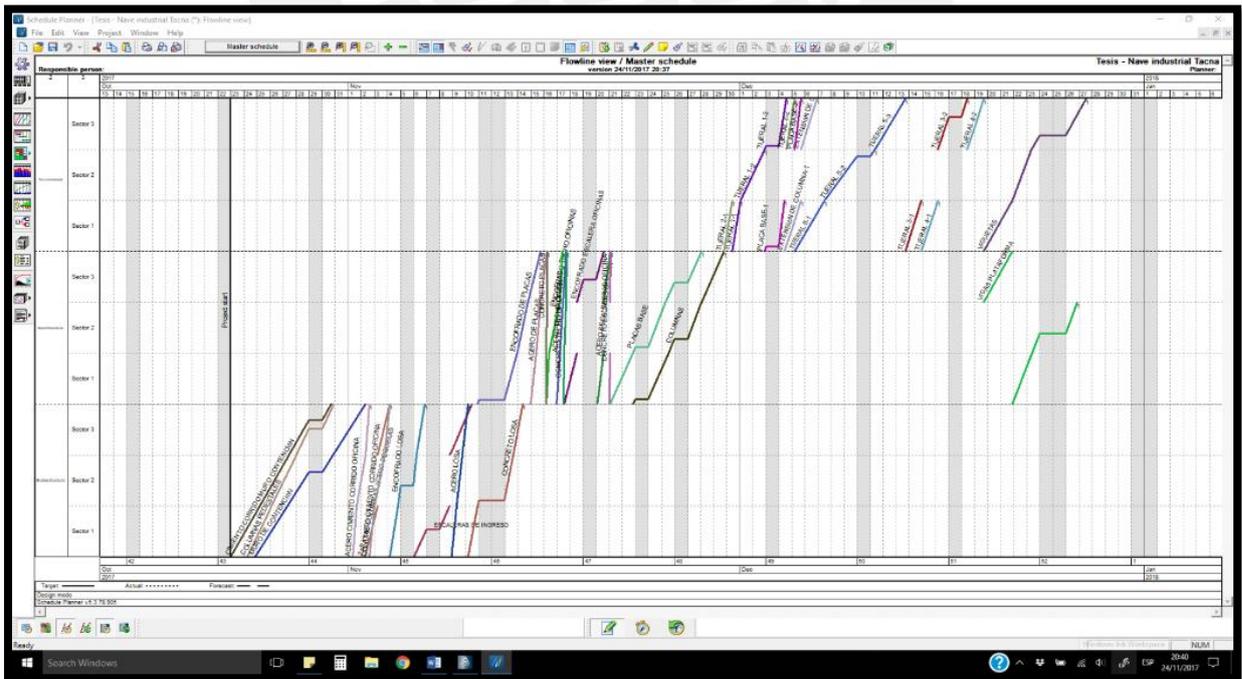


Figura 60: Obtención de flujo en Vico Office (fuente propia)

Fase 10

Una vez concluido el modelado de las líneas de flujo podremos también visualizar la planificación requerida como diagrama de Gantt. Asimismo, los recursos empleados, el histograma de recursos, el tren de trabajo generado, entre otras opciones.

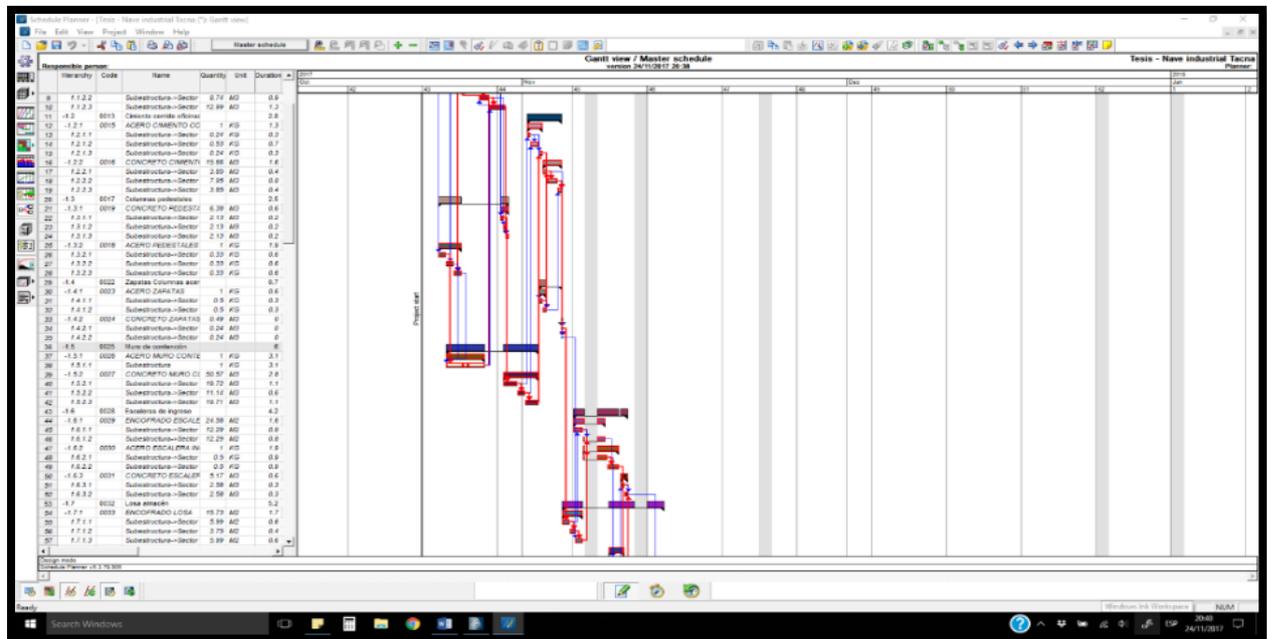


Figura 61: Generación de información complementaria (fuente propia)

3.3 Resultados de programación

A continuación, se presentan los resultados de la programación del caso de estudio 1:

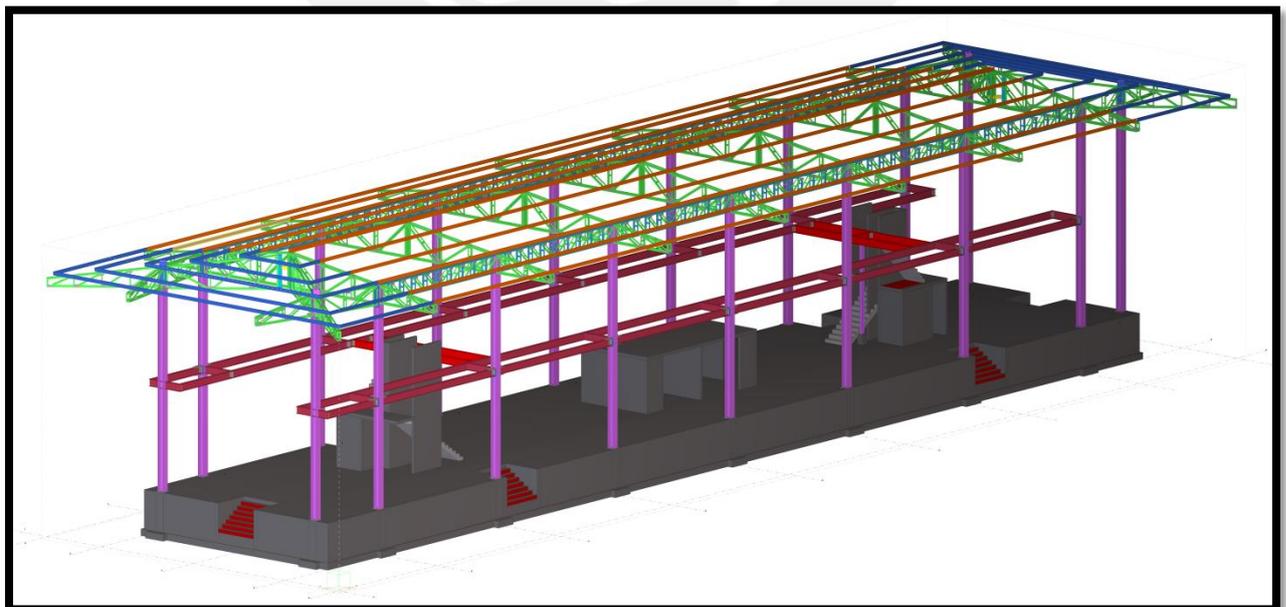


Figura 62: Modelo BIM del caso de estudio 1 (fuente propia)

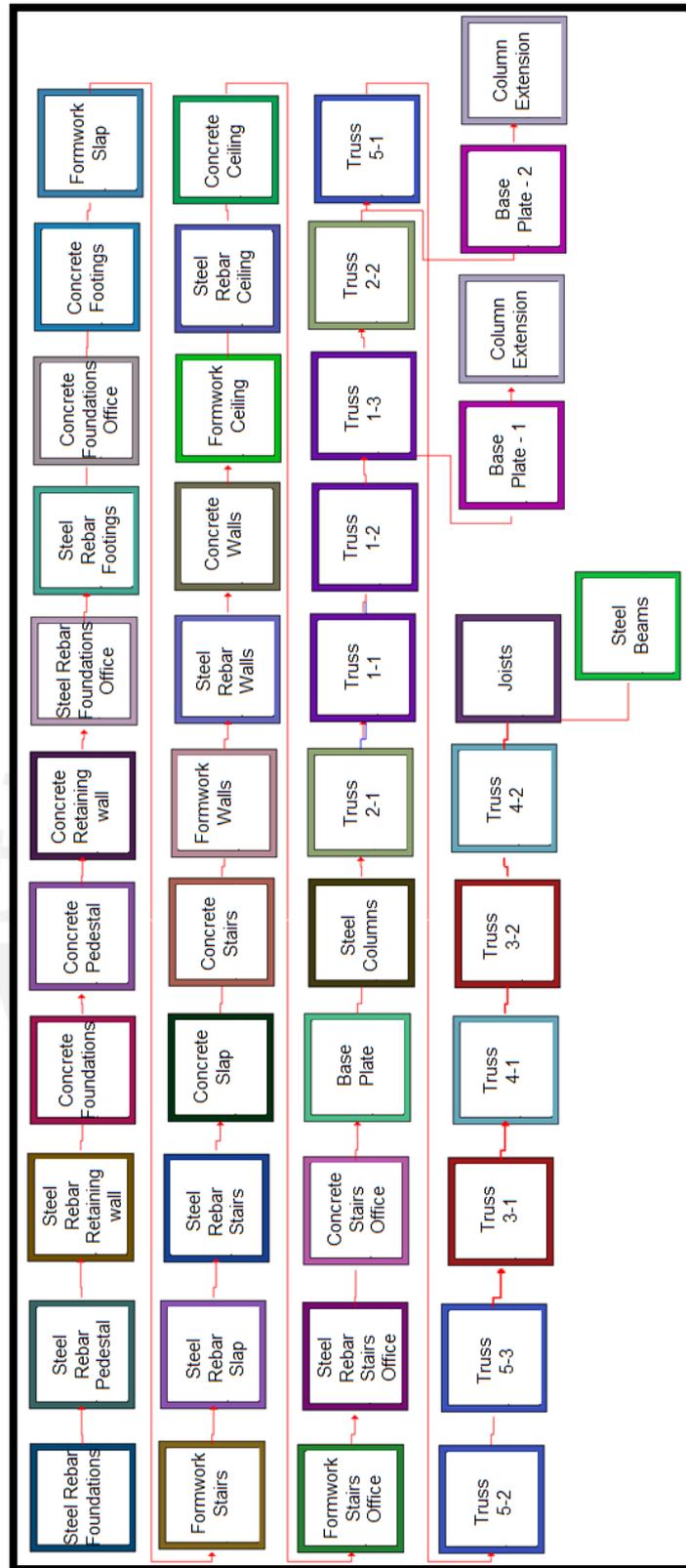
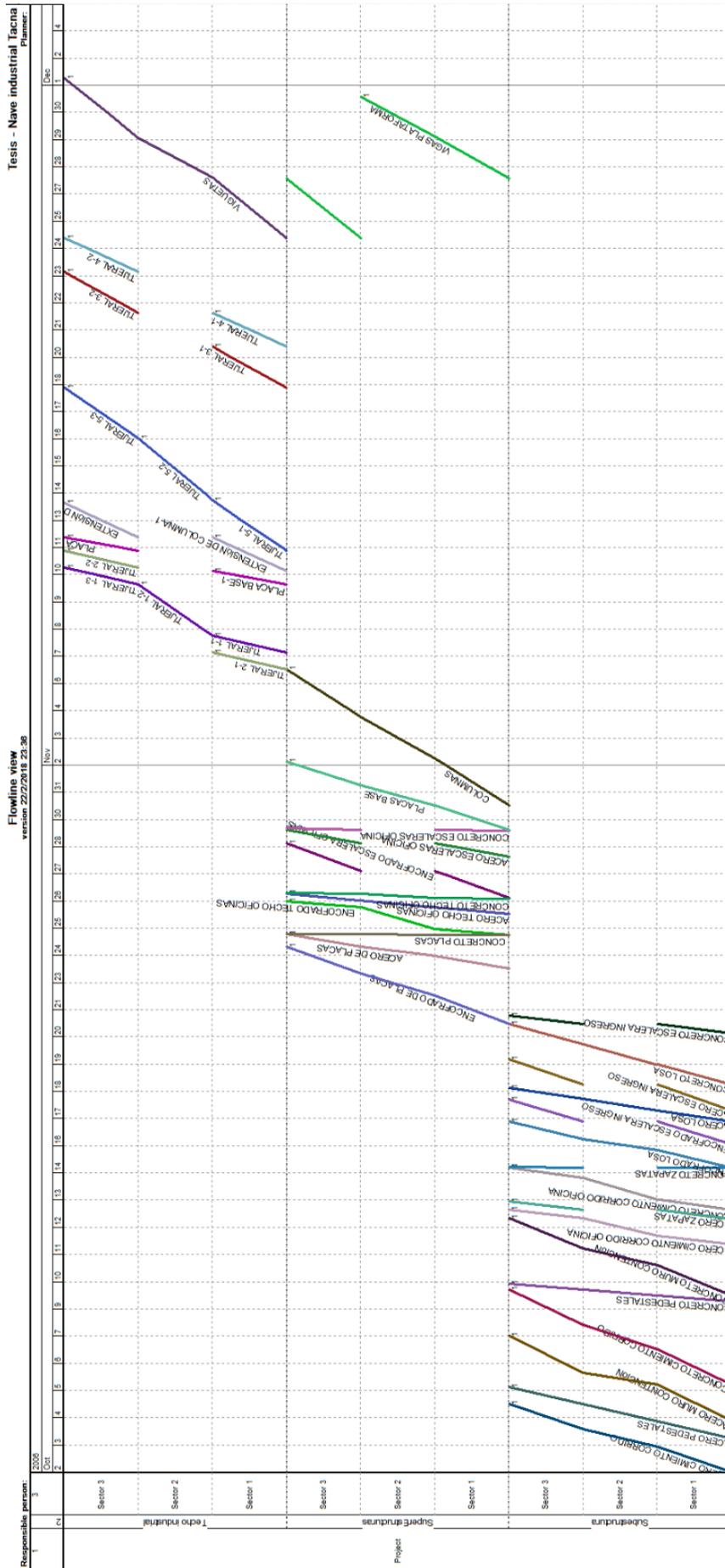


Figura 63: Red de actividades y precedencias del caso de estudio 1 (fuente propia)



4. ESTUDIO DE CASO 2

4.1 Descripción del proyecto

4.1.1 Presentación de la información del proyecto

El segundo estudio de caso consiste en la fase de acabados de una edificación de vivienda masiva. Se realizará la programación a través de líneas de flujo empleando el software Revit 2016 para el modelado 3D y Vico Office para la programación 4D y posterior generación de las líneas de flujo correspondientes a las actividades determinadas. La edificación en estudio está conformada por dos torres contiguas de cinco pisos las cuales forman parte de un conjunto de edificios del proyecto “Ciudad Nueva – Condominio Canta Callao” ejecutado por la empresa INGECO S.A.C.

El proyecto está ubicado en la Parcela 2-A del Ex fundo La Taboada – Valle Bocanegra, Callao, Callao, Lima, a la altura del Km 6 de la carretera Canta Callao. El Condominio es un proyecto tipo MI VIVIENDA y presenta repeticiones en todas sus torres, por lo que se considera un tipo de proyecto repetitivo.

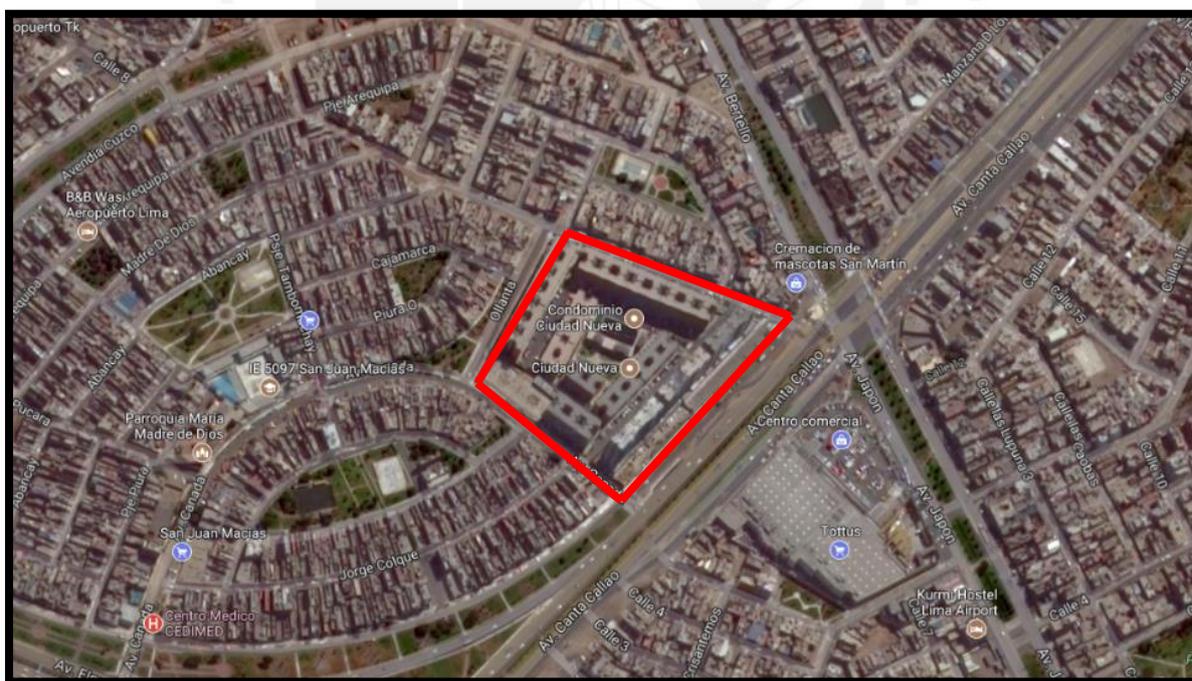


Figura 65: Ubicación del Condominio “Ciudad Nueva” (Adaptado de Google, 2017)

El área de terreno total es de 31,352.25 m² y los linderos del mismo son los siguientes: en el frente, la carretera Canta Callao; por la derecha, la Av. Pisac; por la izquierda, la Av. Canadá y, por el fondo, la Ca. Ollanta.

El alcance total del proyecto contempla 1,384 departamentos distribuidos en 28 edificios, de los cuales 6 son edificios de 15 pisos, 13 son de 8 pisos y 9 de 5 pisos en un área total construida de 99,330.06 m². Las torres a usar en el presente documento de tesis son de 5 pisos albergando 8 departamentos en cada planta, ya que se logra representar adecuadamente el tipo de fase repetitiva buscada.

El proyecto cuenta con una estructura en base a placas de concreto armado de entre 10 y 25cm de espesor en los primeros niveles y llegando a 10cm en los pisos superiores. El resto de cerramientos serán albañilería de 7cm de espesor.



Figura 66: Vista interior del proyecto culminado (fuente: documentación provista por empresa INGECO S.A.C.)

Para la presente investigación, se seleccionó una edificación del condominio compuesta por dos torres. Estas son contiguas y cuentan con 5 pisos de 8 departamentos en cada uno. El área en planta de cada nivel es de 577.5 m² y la configuración es completamente simétrica y repetitiva en los mismos.

En este caso, dentro de la gama de proyectos repetitivos existentes, se eligió una fase de acabados para poder determinar los beneficios que se pueden generar dentro de las particularidades de la misma mediante líneas de flujo. Por ser un proyecto completamente repetitivo, se consideran los rendimientos iguales en cada nivel de acuerdo a la sectorización mostrada a continuación, la cual está basada en el artículo presentado por Murguía, Brioso, & Pimentel (2016).

Se analizarán 7 partidas principales de la fase de proyecto, las cuales cuentan con distintas sub-partidas y actividades que se desean representar y programar en las líneas de flujo. Se desea llegar a representar un nivel de detalle mayor al tradicional en la gestión de proyectos y poder formular un flujo de trabajo continuo que permita gestionar y recopilar las métricas de dicha fase. Es importante mencionar que la programación es una simulación post-construcción y que los valores utilizados en la determinación del rendimiento son un promedio de la información obtenida de (Pimentel, 2016) y el juicio de expertos dedicados a la construcción de vivienda masiva en el Perú.

4.1.2 Detalles de la gestión real de la fase del proyecto

No se encontraron mayores detalles de la programación de la fase de acabados del proyecto, ya que toda la gestión del tiempo de esta fase en específico se basó en hitos y trenes de trabajo muy generales. Así, por ejemplo, los entregables iban de acuerdo al cronograma maestro.

4.1.3 Principales dificultades en la planificación

La gestión del proyecto se desarrolló en un entorno 2D y hojas de cálculo, lo cual ya representa una limitante para poder desarrollar nuevas metodologías o implementar mejoras. La presente investigación se basa en un entorno 3D para generar los modelos virtuales del edificio y las partidas en análisis. Posteriormente, importar dicho modelo para simular una construcción 4D y formular las líneas de flujo de fase.

4.2 Elaboración del modelo 3D

En el proceso de desarrollo del presente caso de estudio y obtención de resultados a partir de los modelos generados se utilizarán dos softwares BIM, Revit 2016 y Vico Office R5.3.

Se presentará el proceso de elaboración del modelo en Revit 2016 y, posteriormente, el proceso de planificación desarrollado en VICO Office del cual se obtiene las líneas de flujo de programación propuestas por los autores en base a los datos y consideraciones mencionadas.

Dado que el caso de estudio seleccionado cuenta con planos en 2D de AutoCAD (Anexos 14 y 15) se tomarán como referencia los mismos para determinar las dimensiones, tipo de elementos y detalles necesarios. Dichos planos serán presentados anexos al final del documento.

4.2.1 Revit 2016

En el presente capítulo se presentará el proceso de modelado 3D en el software BIM Revit 2016 con la finalidad de mostrar los pasos más importantes que se han tomado durante el desarrollo del mismo. Asimismo, el modelo final elaborado llega a un nivel de detalle suficiente para poder ser exportado a VICO Office y facilitar la obtención de resultados concluyentes para el sustento del presente trabajo de tesis.

4.2.1.1 Fases del desarrollo del modelo

Fase 1

Se inicia el modelado 3D en Revit 2016 importando los planos 2D de AutoCAD para utilizarlos como plantilla o guía de trazado de los futuros elementos volumétricos que se presentarán en el modelo. Dado que los elementos a ser analizados son, básicamente, pertenecientes a arquitectura, se trabajará con familias de este tipo. Es importante importar el plano al software con las coordenadas correctamente ubicadas para que posteriormente los elementos y/o planos insertados mantengan linealidad en su altura.

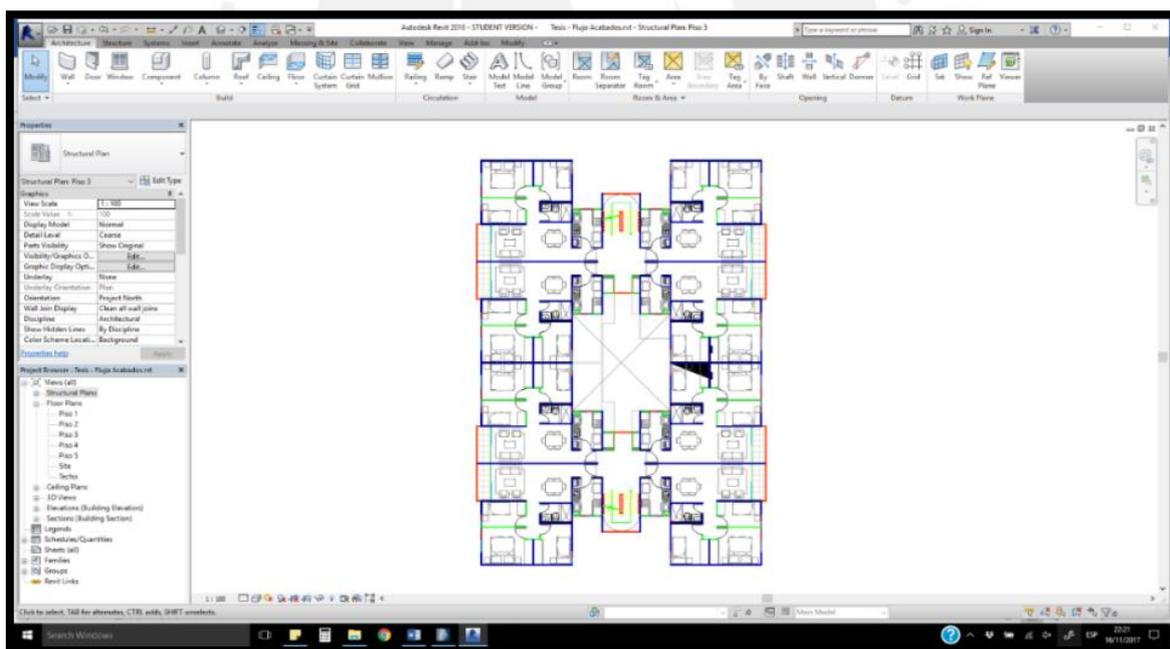


Figura 67: Importación de planos 2D a Revit 2016

Fase 2

Una vez que el plano base está insertado se procede a trazar los niveles y ejes del proyecto. Para ello, se deben analizar los cortes en los planos 2D e identificar las cotas

correspondientes a cada nivel. Una vez que se definen las cotas de cada nivel en el modelo 3D y se les otorga un nombre correspondiente se procede a trazar los ejes en planta.

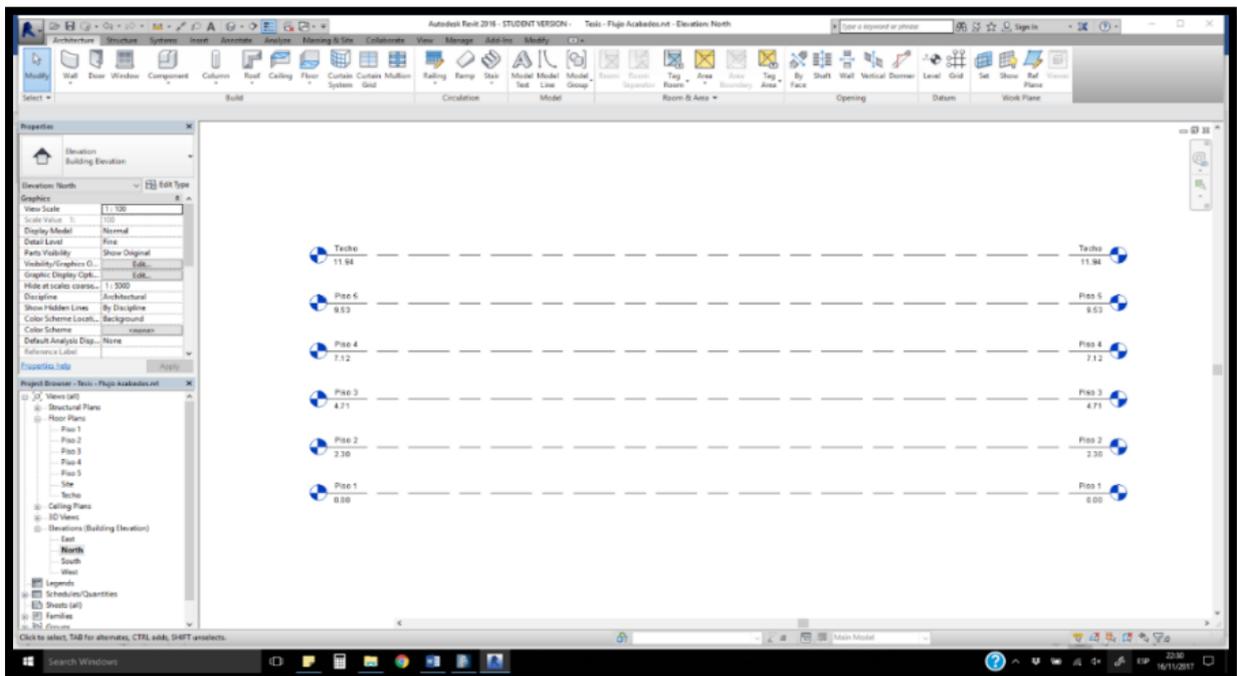


Figura 68: Definición de niveles

Los ejes en planta deben coincidir con los establecidos en los planos, caso contrario se considerará como una incompatibilidad, ya que un desfase en estos puede alterar todo el modelo del proyecto.

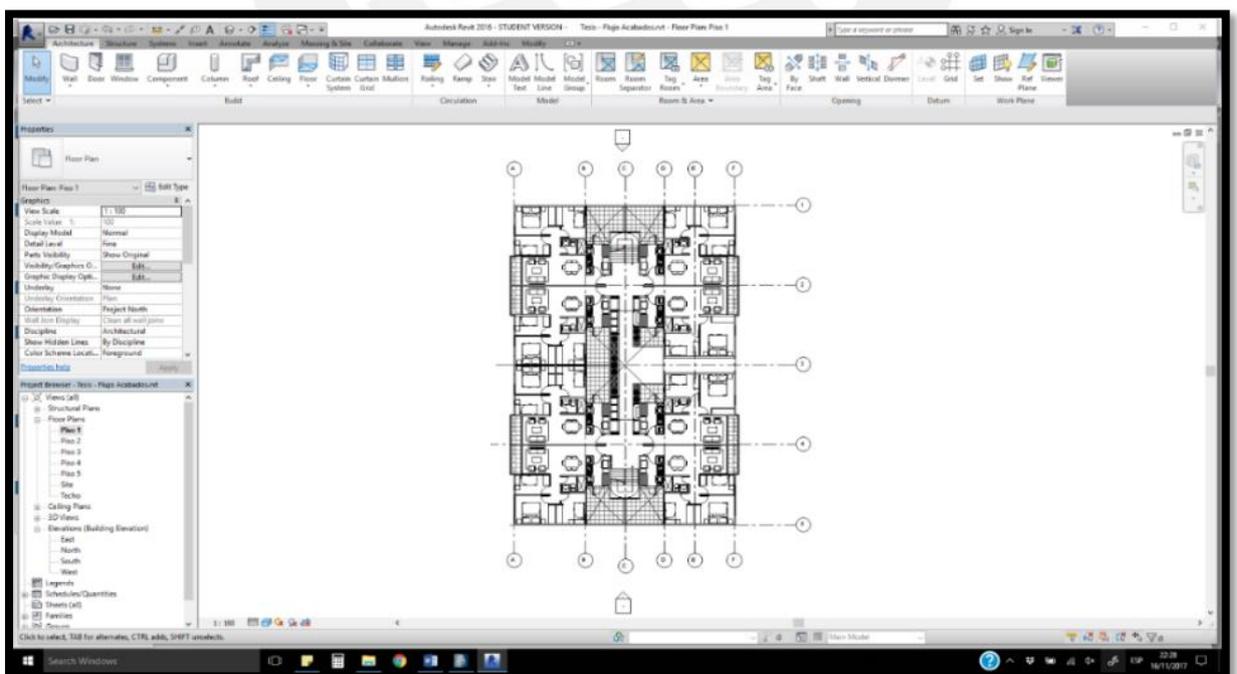


Figura 69: Definición de ejes (fuente propia)

Fase 3

Una vez que los ejes y niveles han sido establecidos se procede a iniciar el modelado a través de la losa del primer piso. Debido a que el plano del nivel ya está importado se sigue el contorno de las áreas para definir las dimensiones de losa. En este proyecto, el nivel 1 es ligeramente diferente, ya que cuenta con los accesos al edificio y las áreas comunes. Los niveles superiores, del piso 2 al 5, son exactamente iguales por lo que se modelará un nivel con la totalidad de acabados y elementos a analizar y luego será replicado en los siguientes pisos.

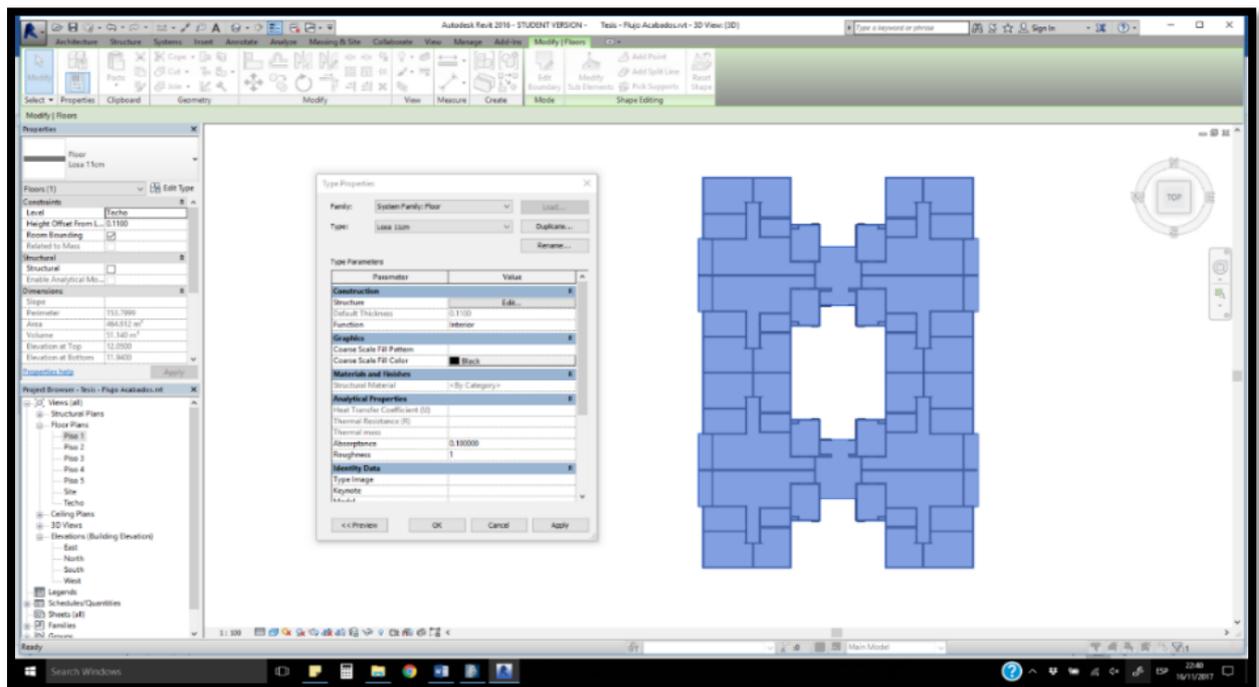


Figura 70: Modelado de losa de primer nivel (fuente propia)

Fase 4

Una vez que se define la losa en el primer nivel, proseguimos a modelar los muros. Dado que es un proyecto de vivienda masiva la estructura está compuesta únicamente por muros de ductilidad limitada en su totalidad. Es importante definir los tipos de muros del proyecto de acuerdo al espesor de los mismos.

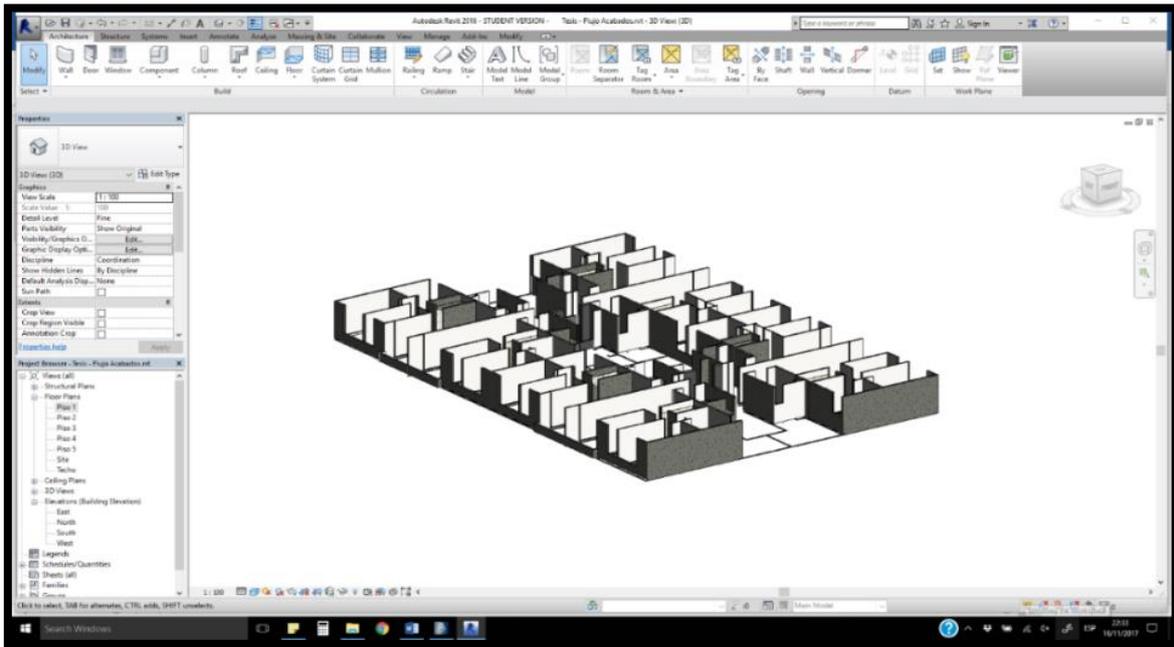


Figura 71: Modelado de muros del proyecto (fuente propia)

Los muros que son modelados deberán ser editados de acuerdo a las necesidades del proyecto y del análisis que se espera realizar posteriormente. Por ello, cada tipo de muro de arquitectura contará con dos superficies de acabado final respectivamente, una interior y otra exterior de características particulares cada una de ellas de acuerdo a la posición y tipo de muro en la distribución en planta. Esto nos servirá para la obtención de las áreas de pintado respectivas.

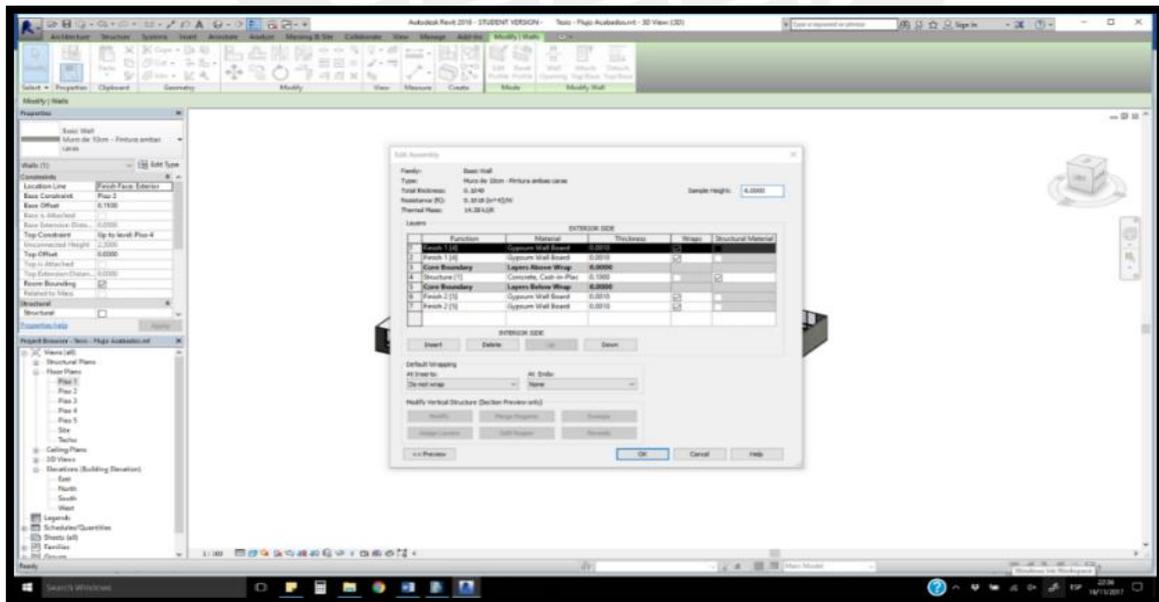


Figura 72: Edición de muros y colocación de capas de acabado (fuente propia)

Fase 5

Con los muros modelados, iniciamos la representación del piso laminado en dormitorios, sala-comedor y pasillos, piso enchapado en cocina y baños y zócalos en todos los ambientes necesarios. Estos serán representados como losas de diminuto espesor, ya que lo que se desea obtener son áreas en el caso de los pisos y metros lineales en el caso del zócalo. También se procede a modelar los enchapados en pared de los baños y de la cocina como muros de espesor diminuto para poder recopilar información del área en metros cuadrados que estos significan.

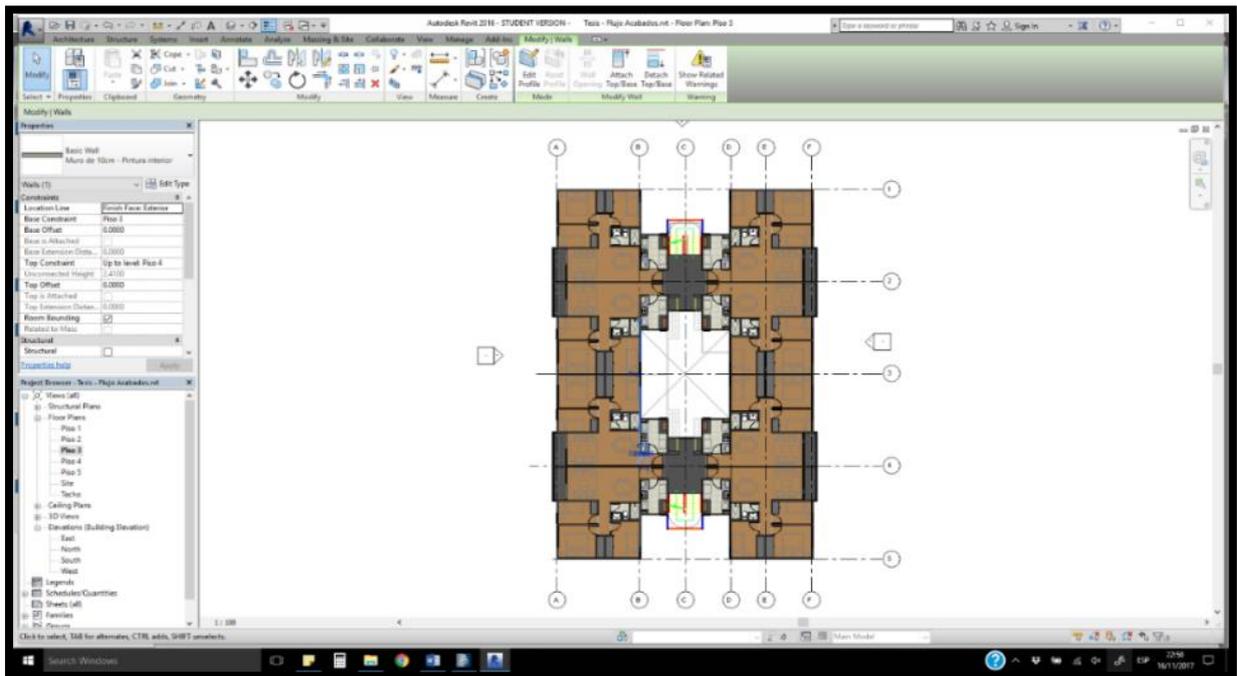


Figura 73: Pisos laminados, enchapados y zócalos (fuente propia)

Fase 6

Procedemos a modelar las puertas, ventanas y mamparas del proyecto. Para ello debemos editar cada uno de los tipos de estos elementos de acuerdo al cuadro de vanos el proyecto. Asimismo, importar familias al modelo que permitan editar los marcos de las puertas y ventanas para poder obtener mayor información de la conformación de estos.

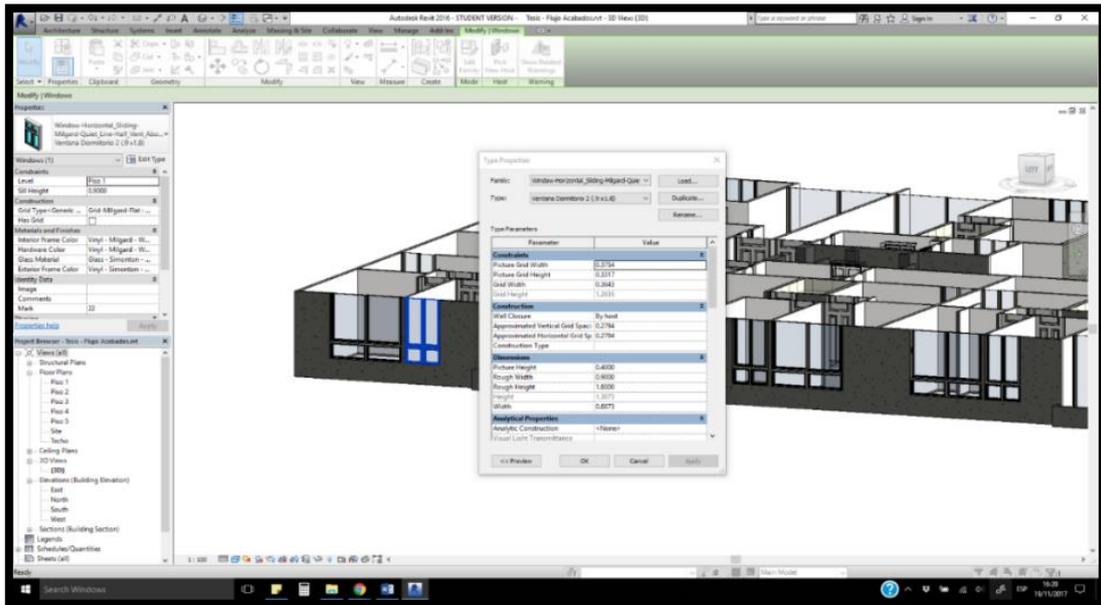


Figura 74: Modelado de puertas, ventanas y mamparas

Fase 7

Una vez que ya está completado los enchapes, pisos, puertas y ventanas procedemos a colocar los elementos adicionales que se desean analizar como lo son los lavatorios, duchas, sumideros y registros, gabinetes, inodoros, entre otros. Para ello, importamos las familias necesarias y editamos las dimensiones de acuerdo a las establecidas en los planos de arquitectura para finalmente posicionarlos de la manera indicada en cada ambiente. Una vez que los elementos más pequeños han sido colocados en sus posiciones finales, ubicamos los muebles principales en los dormitorios y cocina respectivamente.

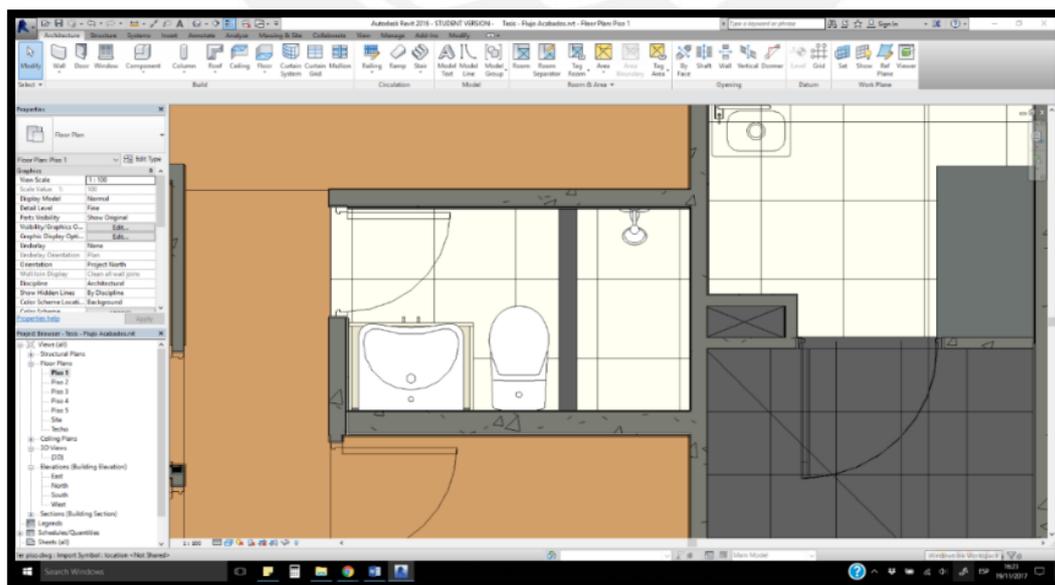


Figura 75: Modelamiento lavatorios, duchas, sumideros, inodoros, etc.

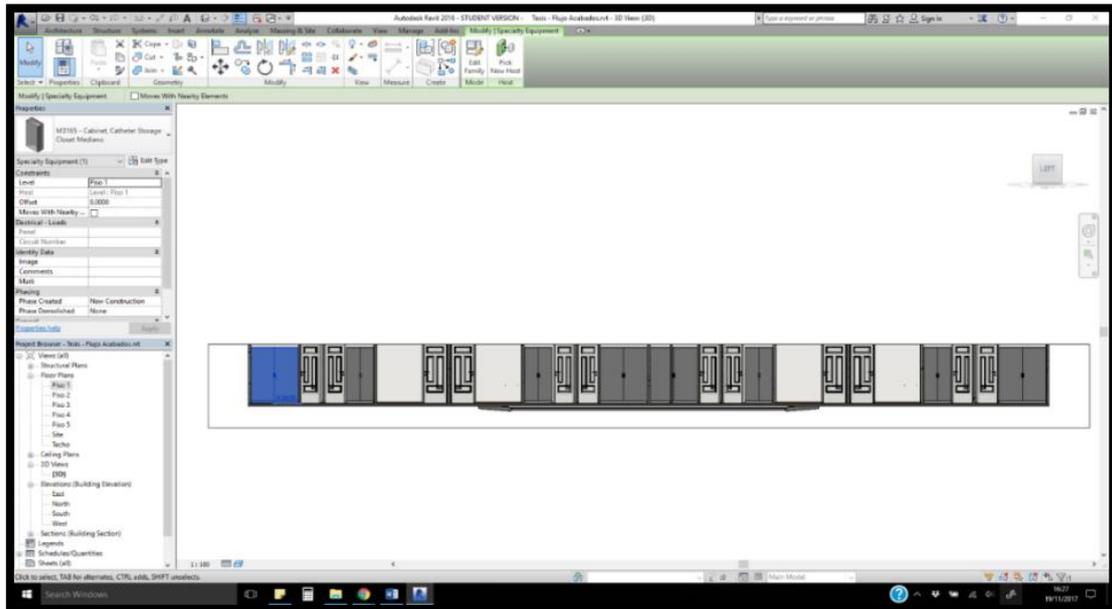


Figura 76: Modelamiento muebles y closets

Fase 8

Una vez que todos los elementos han sido correctamente modelados y posicionados adecuadamente se procede a replicar el nivel 2 a todos los niveles posteriores. Por ello, se seleccionan todos los elementos y se copian del nivel de base hacia todos los niveles superiores desde un punto fijo determinado. Obteniendo el edificio final de 5 niveles listo para poder ser importado al software Vico Office para iniciar con la automatización de los metrados y la programación de fase requerida.

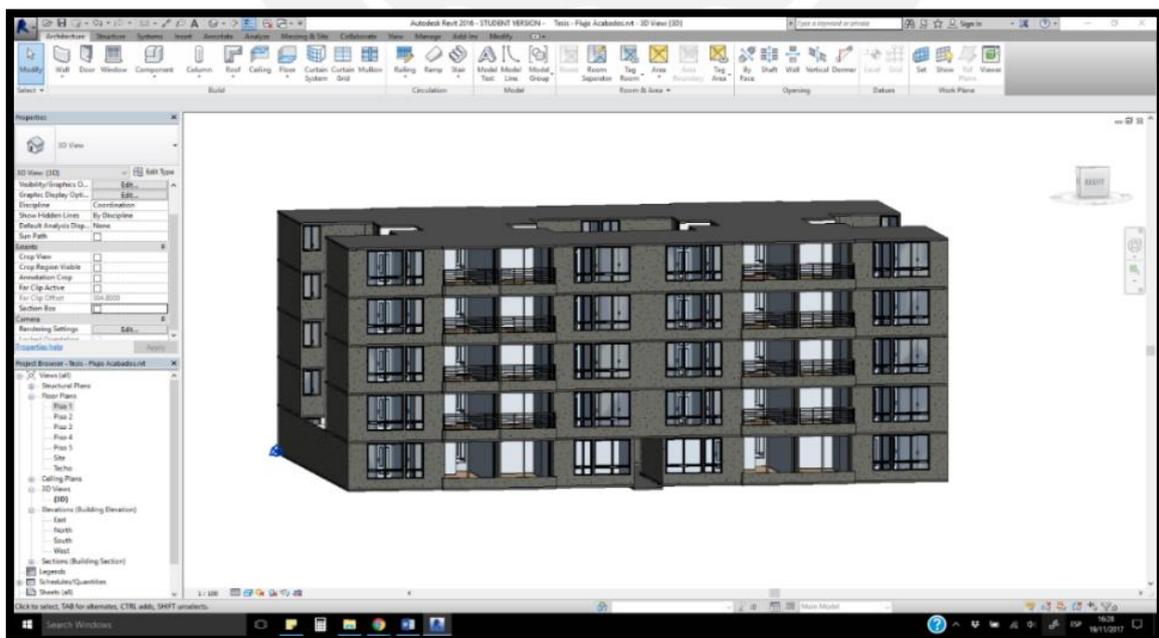


Figura 77: Modelo final del edificio de 5 niveles.

4.2.2 Programación mediante líneas de flujo (VICO Office R5.3)

4.2.2.1 Consideraciones para la generación de líneas de flujo

Se tomaron las mismas consideraciones que en la generación de las líneas de flujo del Estudio de caso 1 (Léase sección 3.2.2.1)

4.2.2.2 Consideraciones del estudio de caso

Para el proyecto repetitivo de fase de acabados, se siguieron pasos parecidos al caso de estudio 1 para el desarrollo de las líneas de flujo en el software Vico Office. Primero, se elaboró el LBS del proyecto. Para esto, se siguió la sectorización real del proyecto, debido a que era la mejor manera de desarrollarlo desde la perspectiva de los autores y en concordancia con lo realmente ejecutado. Así, primero, se dividió el proyecto en dos torres y, luego, en cada planta, se consideraron cuatro sectores idénticos (cada uno incluye dos departamentos) tal como se muestra en la siguiente figura:

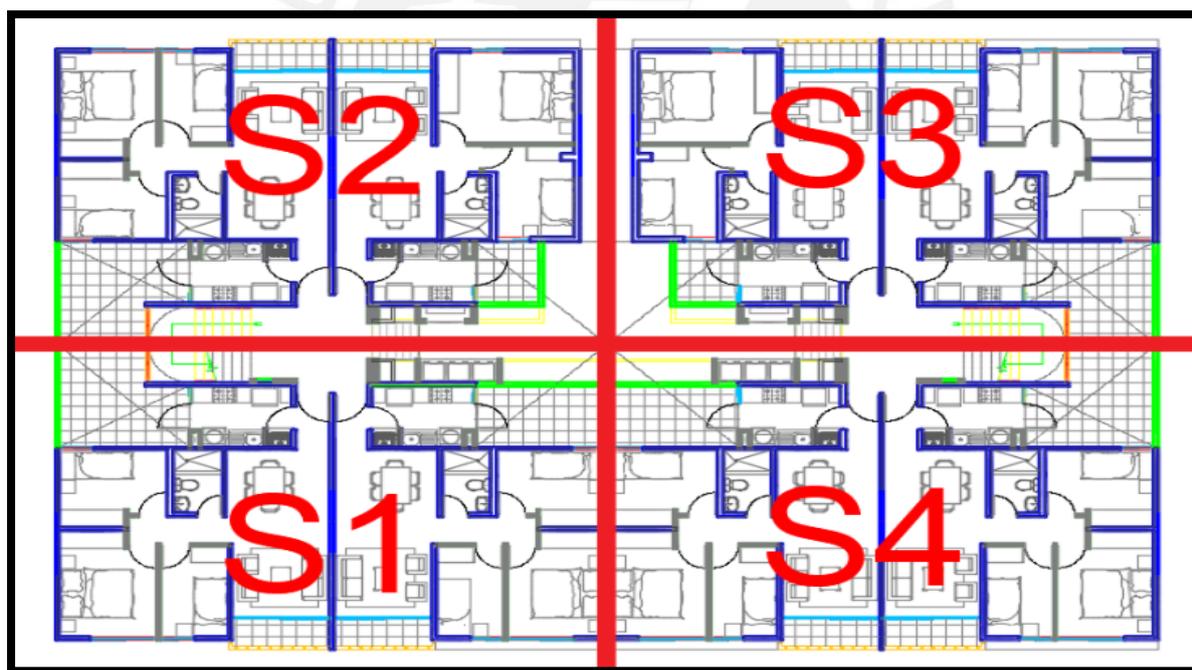


Figura 78: Sectorización proyecto Ciudad Nueva (Adaptado de documentación provista por empresa INGECO S.A.C.)

A partir de lo mencionado y considerando los criterios descritos por Kenley & Seppänen (2010)(explicados en el marco teórico del presente trabajo), se obtuvo el siguiente LBS:

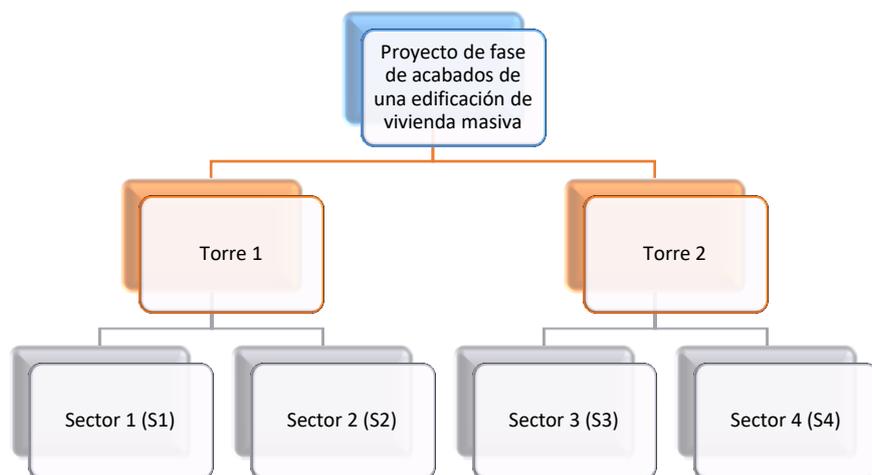


Figura 79: LBS del proyecto de fase de acabados de una edificación de vivienda masiva (elaboración propia)

Las actividades analizadas en el presente caso de estudio, las cuales evidentemente se repiten en cada sector, son presentadas a continuación:

Tabla 6: Lista final de actividades y tareas de proyecto repetitivo (realización propia).

Actividad	Tarea	Código	Velocidad	Unidad
Pintura	1er lijado	A	350	m2/dia
	Imprimado	C	400	m2/dia
	1er empaste	C	230	m2/dia
	2do empaste	C	280	m2/dia
	2do lijado	A	250	m2/dia
	1er pintado	C	180	m2/dia
Puertas	Instalación de marco	B	8	und/dia
	Instalación de puertas con bisagra	B	8	und/dia
Ventanas	Instalación de marco	C	8	und/dia
	Instalación de lunas/hojas	C	16	und/dia
	Sellado de ventanas	B	16	und/dia
Closets	Instalación de estructura principal	D	4	und/dia
	Colocación de estantes y repisas	D	40	und/dia
	Instalación de cajones	C	12	und/dia
	Instalación de puertas	D	12	und/dia
	Colocación de tiradores	C	40	und/dia
Pintura	Masillado	C	300	m2/dia
	3er lijado	A	250	m2/dia
Puertas	Primer pintado de marco	C	7	und/dia
	Segundo pintado de marco	C	7	und/dia
Pintura	2do pintado	C	180	m2/dia
Pisos	Instalación de piso laminado	C	90	m2/dia
	Instalación de contrazocalo	C	90	ml/dia
Puertas	Recolgado de hojas	B	16	und/dia
	Instalación de chapas y cerradura	B	8	und/dia
Pintura	3er pintado	C	180	m2/dia

Los códigos considerados representan la cuadrilla y la velocidad que se consideró para desarrollar la programación de fase en líneas de flujo. La tabla 7 presenta los 6 tipos de cuadrillas que se formaron para la fase de acabados del proyecto repetitivo a analizar.

Tabla 7: Conformación de cuadrillas de trabajo en proyecto repetitivo (realización propia)

	Cuadrilla	Código	Operario	Ayudante
1 Ayudante	1	A	-	1
1 Operario	2	B	1	-
1 Operario + 1/2 Ayudante	3	C	1	1/2
1 Operario + 1 Ayudante	4	D	1	1

El flujo de trabajo propuesto supone que todos los recursos y/o requisitos previos para iniciar el trabajo estarán disponibles y los trabajadores podrán realizar sus actividades continuamente sin la interferencia o retrasos por motivos externos (Kenley & Seppänen, 2010).

4.3 Elaboración del modelo 3D

A continuación, se presentan los resultados de la programación del caso de estudio 2:



Figura 80: Modelo BIM del caso de estudio 2 (fuente propia)

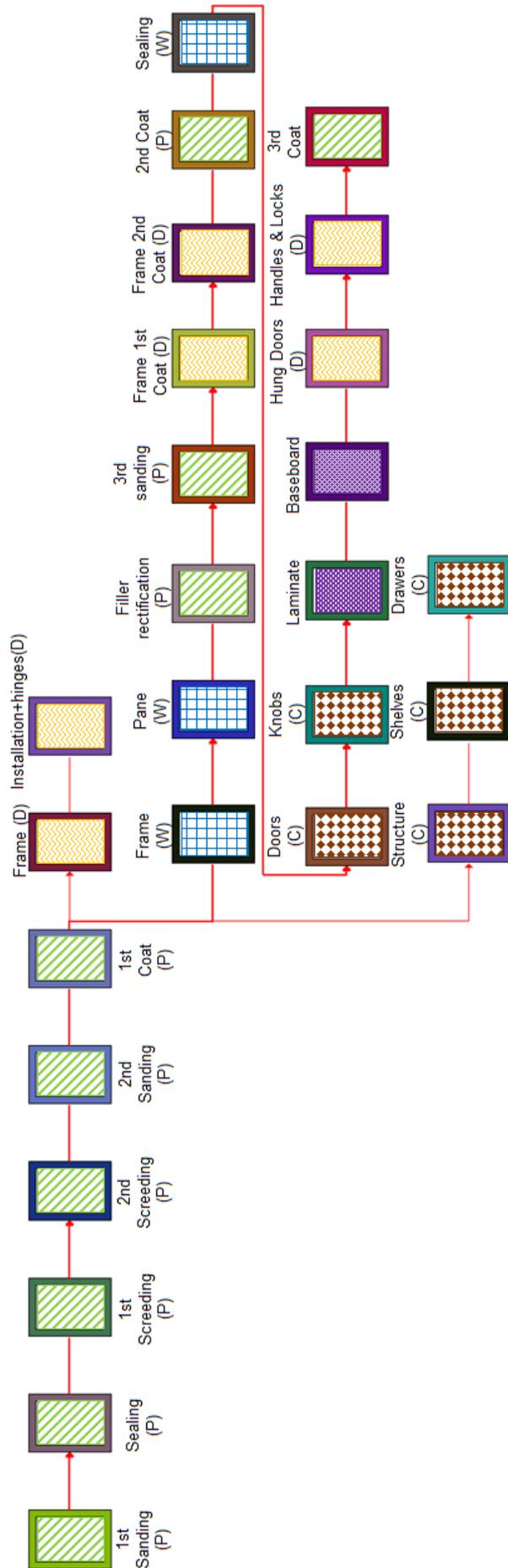


Figura 81: Red de actividades y precedencias del caso de estudio 2 (fuente propia)

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Discusión a partir de los casos de estudio

De acuerdo con las líneas de flujo obtenidas, se evidencia que la identificación de actividades en una fecha y locación dada, así como su predecesora y sucesora es instantánea. Gracias a esto, correspondiente al proyecto no repetitivo, se puede determinar rápidamente que en el proceso de montaje de los tijerales de la nave industrial se presentan muchos tiempos muertos o sectores inactivos (vacíos). La programación considero estos tiempos muertos debido a principalmente a dos motivos además de temas de precedencia:

1. Existen temas contractuales en el proyecto, en los que cada contratista podía iniciar actividades siempre y cuando la actividad precedente haya concluido.
2. Existe escasez de recursos: solo se cuenta con una (1) grúa.

El proceso y la duración de la realización del LBS fueron muy distintos entre los casos de estudio analizados. En el segundo caso, el correspondiente a la fase de acabados de una edificación de vivienda masiva, el proceso fue bastante sencillo, se identificaron rápidamente los elementos repetitivos del primer nivel: torres, las cuales contenían trabajos exactamente iguales; luego, se identificaron los elementos repetitivos del segundo nivel: los departamentos, los cuales también contenían trabajos exactamente iguales, y se agruparon en sectores (2 departamentos por sector). En este caso, los recursos, las cuadrillas y el flujo de trabajo necesario son los mismos en cada una de las locaciones seleccionadas. Por otro lado, el proceso de realización del LBS del primer caso de estudio, el correspondiente a la fase de estructuras de una nave industrial, sí requirió de bastante análisis e, incluso, de iteraciones. Primero, se hizo una división marcada entre niveles: subestructura, superestructura de concreto, superestructura de acero y techo. Una vez realizada esto, dadas las evidentes diferencias de trabajo, se analizó si se debían considerar locaciones parecidas en cada una de las primeras divisiones del LBS o locaciones completamente diferentes. Este proceso requirió de ensayos de prueba y error y de un análisis de las conveniencias de cuál elegir. Finalmente, se identificó que se presentaban ciertas similitudes y patrones de repetición entre locaciones al dividir cada nivel en 3 sectores. A esta elección final se llegó considerando que un proyecto es la suma de partes repetitivas y no repetitivas. De esta forma, en las líneas de flujo resultantes del proyecto no repetitivo, se aprecian, a la vez, la programación de la subestructura y de la superestructura de concreto (parte repetitiva) y la programación de la superestructura de acero y el techo (parte no repetitiva). Entre ellas existe una diferencia que consiste en que, para el primer caso, las

pendientes y la sucesión de actividades es constante, lo cual muestra y evidencia la parte repetitiva de esta parte. Por otro lado, para el segundo caso, se aprecian claras discontinuidades y variaciones de pendientes (productividades) conforme se va cambiando de locaciones. Esto último se debe a que, a pesar de haber tratado de dividir las locaciones lo más equitativamente posible en términos de cantidad de trabajo, de todas maneras se mantiene la variabilidad tanto en el trabajo como en los retos en cada locación.

Por otro lado, correspondiente al proyecto repetitivo, se aprecia que las relaciones de precedencia se ven disminuidas significativamente; por ejemplo, la partida de pintura se repite en cada una de las locaciones de menor nivel. Dado que son dos locaciones por piso y se tienen cinco pisos y dos torres, esta partida, utilizando un método tradicional basado en actividades (por ejemplo, CPM), se repetiría veinte veces. Sin embargo, usando líneas de flujo, la partida de pintura se representa en un solo elemento: una línea. Con respecto al proyecto no repetitivo, se observa en el LBS que no necesariamente las locaciones están divididas en función a un metrado equitativo en cada una de ellas. Esto se debe a que existe gran variabilidad entre piezas estructurales de la nave industrial y una posible división de sectores por metrados podría dividir una pieza ya armada en dos locaciones, lo cual es inviable para realizar la programación. Así, en dicho proyecto, se dividió los sectores tomando como límites juntas o empalmes.

En la programación de fase de acabados del proyecto repetitivo, se aprecian que las actividades si mantienen una pendiente continua lo cual muestra que el flujo y precedencias es adecuado para las cantidades a realizar. Solo una actividad retrasa su inicio, automáticamente a través del software, para asegurar que la productividad asignada se mantenga y no genere sobre costos al alargar innecesariamente la actividad. Por otro lado, en las líneas de flujo no repetitivo, no se observan cruces, pero se aprecia claramente la división del proyecto en sus 3 etapas.

Los casos en que se parecía un cruce de líneas de flujo en el proyecto repetitivo son debidos a un retraso intencional en el inicio de la actividad. Esto genera que se preserve el flujo de recursos y actividades de acuerdo a lo programado y no se extiendan tareas. Solo se pueden aceptar cruces en los que ninguna de las tareas involucradas es precedente de otra, ya que manifestaría un error en el flujo.

Discusión a partir de los software BIM

Con relación al uso de software BIM, se observa que contribuye ampliamente con la visualización para los programadores, planificadores y el personal en general. Asimismo, estas herramientas permiten detectar incompatibilidades entre planos, identificar errores tempranamente, reducir el error humano y automatizar procesos de programación y control.

Además, al emplear estas herramientas en la fase de programación de proyecto, se agiliza y aumenta la comprensión total del alcance, ya que la visualización de todos los elementos y componentes es absoluta y, a su vez, se relaciona cada detalle de los elementos que se van a requerir con las tareas que serán desarrollados sobre estos.

6. CONCLUSIONES

Con respecto a la historia de los métodos de programación en la construcción

A raíz del estudio de la historia de la evolución de los diversos métodos de programación y planificación, se concluye que los mismos no han cambiado significativamente con el pasar de los años. Los usos se han ido mejorando a la par con las herramientas tecnológicas usadas; sin embargo, la esencia del concepto se mantiene y existe desde hace cien años. Así, se torna importante una permanente atención a la totalidad de los diversos métodos existentes en las ramas ingenieriles, ya que aunque algunos sean aparentemente anticuados o inviables en la actualidad pueden ser la base y el inicio de una nueva tendencia en las distintas áreas de la ingeniería civil.

Con respecto a proyectos repetitivos y no repetitivos

En proyectos no repetitivos, dada la complejidad de la planificación y la programación y los riesgos que esta representa, sería conveniente trabajar con elementos prefabricados y maximizar la industrialización de la construcción. Este hecho transferiría los riesgos in-situ al proveedor. Consideramos que la programación desarrollada a partir del uso de líneas de flujo puede ser utilizada para estructurar flujos de paquetes de trabajo de tal forma que se le den prioridad a los elementos según el orden y secuencia en el que se van a montar en obra. Esto contribuiría en gran magnitud con el hecho de realizar la menor cantidad de movimientos de los elementos en campo, con no tener que almacenar gran cantidad de piezas de un peso significativo, mantener despejada, limpia y libre de obstáculos el área de trabajo, evitar que se dañen o se afecten las piezas que no están siendo utilizadas y evitar los tiempos de esperas o tiempos perdidos que representa realizar todas las actividades antes mencionadas. No obstante, estos requerimientos demandan que no se generen retrasos en la fabricación ni en el envío, ya que si estas actividades se retrasan todo el proyecto se ve afectado considerablemente y las cuadrillas no contarían con trabajo suplente que pueda equiparar las pérdidas generadas.

Con respecto a las preguntas de investigación

Se responden las preguntas de investigación planteadas inicialmente:

¿La utilización de líneas de flujo y modelos BIM optimiza el tiempo total de realización de un proyecto?

No necesariamente el uso de líneas de flujo asegura que la duración total del proyecto será reducida. A partir de la presente investigación, se concluye que las líneas de flujo representan una herramienta de visualización y organización que permite tener una visión más holística y ordenada del flujo del proyecto. Así, las líneas de flujo presentan la información de manera concisa en un solo documento donde las locaciones están definidas en el eje "Y", el tiempo en el eje "X" y las tareas mediante líneas que a su vez muestran ratios de producción, recursos y buffers. Por consiguiente, es sencillo identificar rápidamente el día en el que una actividad se va a desarrollar, en qué locación del proyecto y si la productividad es crítica o no, a partir de la pendiente de la línea. Asimismo, las líneas de flujo reducen significativamente las relaciones de precedencia que se deberían plantear en otros métodos de programación como CPM o PERT. Esto último debido a que las locaciones están definidas en el diagrama y las tareas son las que se desplazan sobre el mismo de forma que no se genera un documento muy extenso donde se repitan las actividades y se deben crear múltiples relaciones de precedencia.

El beneficio de la herramienta puede influir en el tiempo total del proyecto de dos maneras:

1. Incremento de la duración planteada inicialmente debido a una detección temprana de problemas en el flujo de trabajo.
2. Reducción de la duración planteada inicialmente por optimización del flujo de trabajo.

¿La utilización de líneas de flujo y modelos BIM influye en el análisis del flujo de trabajo del proyecto?

Se concluye que la utilización de líneas de flujo influye significativamente en el análisis del flujo de trabajo del proyecto, ya que se logra contemplar aspectos que podrían modificar la planificación y programación, tales como los siguientes:

- a. Sobre-estimación de la productividad.
- b. Omisión de interacciones necesarias entre cuadrillas, partidas y sub-contratistas por temas de precedencia, temas contractuales, espacios comunes de trabajo y recursos comunes.
- c. Conformación de cuadrillas.
- d. Delimitación y cuantificación de locaciones.

- e. Inicio con anticipación excesiva de determinadas actividades.
- f. Necesidad de retraso de actividad por eficiencia en costo. Por ejemplo, en determinada locación se podría perder eficiencia si se trata de reducir el número de integrantes de la cuadrilla o el número de cuadrillas para ampliar el plazo de la tarea en búsqueda de alinear las pendientes. Este análisis es determinante para la asignación de recursos y sugiere que no siempre es adecuado alinear las pendientes de dos tareas consecutivas.
- g. identificación de esperas, tiempos muertos o vacíos entre actividades sucesivas con las que el lector puede reconocer los tiempos de buffer asignados a cada tarea.

A partir de las líneas de flujo generadas en ambos casos de estudio, también se concluye que pueden existir cruces entre líneas cuando estas no tengan una relación de precedencia. En caso no exista dicha precedencia, este cruce representa una confluencia de dos tareas siendo desarrolladas en una misma locación. Esto podría ocasionar algunas alteraciones en el flujo estimado debido a que el espacio físico no podría ser suficiente para albergar la cantidad de trabajadores que deben estar en esa locación ni los recursos que estos requieren (y así el espacio fuese suficiente, se podrían incumplir determinadas normas o buenas prácticas de seguridad), lo que podría generar retrasos. Por ello, dichos cruces deben verificarse antes de culminar la programación de fase de forma que se compruebe que la coincidencia de actividades en una locación no llegue al nivel de un traslape de actividades en un ambiente (una locación puede contener varios ambientes). Es importante resaltar, que un exceso de cruces puede dificultar la visualización de las líneas; ante esto, mediante el uso del software Vico Office se podrían aislar las tareas en observación.

De lo mencionado, además se puede concluir que las líneas de flujo son muy compatibles con las herramientas de Lean Construction, como Last Planner System, ya que están alineadas con la filosofía Lean de minimizar pérdidas y maximizar valor conforme a lo descrito en todas las conclusiones anteriores. Juntos y automatizados en una sola plataforma, las líneas de flujo, BIM y Lean Construction serían una herramienta muy potente para la industria

¿Cuál es la diferencia entre aplicar líneas de flujo a la programación de un proyecto repetitivo y a la de uno no repetitivo?

Definitivamente, las líneas de flujo impactan de manera más significativa en proyectos no repetitivos en comparación con su aplicación a proyectos repetitivos. Esto sucede, porque los proyectos repetitivos son sencillos de programar, por lo que pueden utilizar cualquier

metodología y no presentaran muchas complicaciones. Por otro lado, los proyectos no repetitivos, al ser muy complejos, presentan múltiples inconvenientes y restricciones que requieren de mayor análisis y de mejores herramientas. Así, la correcta aplicación de líneas de flujo a proyectos no repetitivos, aunque complicada al inicio, generará un impacto notable en los mismos. A nivel mundial, el uso de métodos de gestión en la ejecución de proyectos no repetitivos no es preciso ni detallado debido a la complejidad que puede significar para algunos este proceso. Puede resultar muy complicado estructurar una programación en CPM, lo cual conlleva a la ausencia de gestión integrada y simplemente se trabaja siguiendo una secuencia semanal; sin embargo, esta falencia se podría cubrir utilizando líneas de flujo. La gente no usa generalmente métodos basados en locaciones, porque piensan que es muy complejo tener diversas divisiones en cada nivel, pero una vez que cuentan con experiencia y comprenden el proyecto totalmente, la definición y el uso de las líneas de flujo se vuelve mucho más simple y eficiente.

A partir de la realización de los LBS de ambos casos de estudio, se puede concluir que todo proyecto no repetitivo se puede trabajar como la suma de partes repetitivas con unas cuantas partes no repetitivas. Así, para la preparación del LBS (uno de los pasos iniciales de la programación), se debe tratar de identificar la mayor cantidad de partes repetitivas en el proyecto no repetitivo y así dividir de la forma más eficiente en función del flujo de trabajo. Esto se debe realizar incluso cuando las cantidades de trabajo y la distribución de las ubicaciones cambien a lo largo de las etapas de construcción. A partir de lo mencionado, sería bastante complejo garantizar que una misma tarea tenga la misma productividad en cada locación en un proyecto no repetitivo. Esto se debe a que, en cada locación, se puede encontrar un flujo de trabajo diferente con retos diversos, como complejidades distintas de las actividades, posicionamientos variables de los elementos por colocar, accesos diferentes a las áreas de trabajo, complejidad en el diseño de buffers de capacidad, recursos insuficientes, entre otros. Por este motivo, sería ideal anticiparse al trabajo en las diversas locaciones, determinar productividades variables, establecer buffers, analizar disponibilidad de recursos para cada locación y, en función a todos los factores mencionados, intentar conseguir la mayor cantidad de líneas de flujo paralelas considerando especialmente las de menos productividad y/o las que cuentan con insuficientes recursos para trabajar más rápido. Cabe resaltar que, en casos en los que el proyecto no repetitivo presente partes muy variadas, el programador podría usar líneas de flujo o CPM o alternar entre ellas en las diversas locaciones según lo que le convenga.

En la delimitación y distribución de sectores en un proyecto no repetitivo, se deben considerar, principalmente, las restricciones estructurales, de accesos, de geometría y de especificidad tanto de mano de obra como de maquinaria antes que el balanceo de locaciones en base a metrados similares.

En proyectos no repetitivos, sería conveniente contar con operarios poli funcionales (por ejemplo, un soldador-oxigenista). Esto se debe a que, dado que pueden existir tareas únicas en diversas locaciones, contar con operarios especializados solo en una tarea podría generar sobrepoblación de mano de obra específica, que en muchos casos, si cierta actividad especializada se repite cada cierto tiempo prolongado, estaría inactiva. Este hecho se empeoraría si el proyecto se está ejecutando en una zona alejada, donde la mano de obra especializada es escasa.

Con respecto a los software BIM

Finalmente, a raíz del empleo de software BIM integrados para la generación de modelos 3D en las plataformas seleccionadas, como lo son Revit 2016 para representar los acabados del proyecto de viviendas multifamiliar y Tekla Structures 21.1 para la planta industrial, se concluye que reducen significativamente los problemas que se puedan generar in-situ, dado que esta representación virtual permite a los planificadores y programadores alertar a los responsables de producción de cualquier incompatibilidad o interferencia. Asimismo, la revisión y constante retroalimentación del personal que estará en obra para un mayor nivel de precisión y detalle involucrado como se pudo validar en la reunión con la empresa MECTEC CONTRATISTAS GENERALES S.A.C. Se ha comprobado el potencial de dichas herramientas en la verificación de incompatibilidades, obtención de metrados, decisiones sobre los procesos a considerar y reconsideración de plazos y mano de obra necesaria. También, estos modelos 3D alientan a la generación de modelos 4D y 5D gracias a sus formatos interoperables. Así, se pudo validar el potencial de la herramienta Vico Office para poder recibir dichos modelos y ofrecer la posibilidad de automatizar la planificación de obra a un alto nivel de detalle. La disponibilidad y la flexibilidad para poder gestionar el proyecto bajo metodologías basadas en locaciones permitieron realizar la programación tanto del proyecto no repetitivo como del repetitivo sin mayores complicaciones y representarla en líneas de flujo. A pesar de lo mencionado, es importante igual recalcar que los software BIM aún cuentan con ciertas limitaciones de interoperabilidad, las cuales, una vez resueltas, facilitarían en gran medida la adaptación de la comunidad ingenieril a las herramientas computacionales BIM.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Adamiecki, K. (1909). *Metoda wykreslna organizowania pracy zbiorowej w walcowniach*. Heidrich.
- Alreshidi, E., Mourshed, M., & Rezgui, Y. (2017). Factors for effective BIM governance. *ASCE Journal of Building Engineering*, 89-101.
- Arayici, Y., Coates, P., Koskela, L., Kagioglou, M., Usher, C., & O'Reilly, K. (2011). Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice. *Automation in Construction*, 189-195.
- Architects, A. I. (1994). *The Architect's Handbook of Professional Practice*. Washington, DC.
- Azhar, S., Hein, M., & Sketo, B. (2008). Building Information Modeling: Benefits, Risks and Challenges. *The 44th Asc National Conference*. Auburn, Alabama, USA.
- Azhar, S., Khalfan, M., & Maqsood, T. (2012). Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 15-28.
- Ballard, G. (2000a). *Lean Project Delivery System. LCI White Paper - 8 Revisión 1*.
- Ballard, G. (2000b). *The Last Planner System of Production Control. Thesis*. The University of Birmingham.
- Ballard, G. (2008). The Lean Project Delivery System: An Update. *Lean Construction Journal*, 8., 1-19.
- Ballard, G., & Tommelein, I. (2016). Current Process Benchmark for the Last Planner System. *Lean Construction Journal*, 57-89.
- Baptista, M. (2015). Análise da interoperabilidade aplicada ao projeto BIM de Estruturas Metálicas (Tesis de maestría en Ingeniería Mecánica). Porto.
- Brioso, X., Murguía, D., & Urbina, A. (2017). Teaching Takt-Time, Flowline, and Point-to-point Precedence Relations: A Peruvian Case Study. *Procedia Engineering*, 196, 666-673.
- Dave, B., Hämmäläinen, J.-P., Kemmer, S., Koskela, L., & Koskenvesa, A. (2015). Suggestions to improve lean construction planning. *Proc. 23rd Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction*, (págs. 193-202). Perth, Australia.
- Davila Delgado, J. M., Brilakis, I., & Middleton, C. (s.f.). Modelling, management, and visualisation of structural performance monitoring data on BIM. *International Conference on Smart Infrastructure and Construction*, 543-549.
- Eastman, C., Liston, K., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modelling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- El-Marashly, A. (1990). Project Management as Perceived from Ancient Egyptian Projects. En H. Reschke, & S. H., *Dimensions of Project Management* (págs. 275-290). Berlin: Springer.

- Frandsen, A. (18 de Noviembre de 2015). Obtenido de Lean Construction Blog: <http://leanconstructionblog.com/A-Brief-History-of-Location-Based-Scheduling-and-Takt-Time-Planning.html>
- Frandsen, A., Berghede, K., & Tommelein, I. D. (2013). Takt time planning for construction of exterior cladding. *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, (págs. 527-536).
- Frandsen, A., Seppanen, O., & Tommelein, I. D. (2015). Comparison Between Location Based Management and Takt Time Planning. *23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, (págs. 3-12).
- Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O., & Raahemifar, K. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1046-1053.
- Google. (20 de Noviembre de 2016). *[Mapa de Complejo Fronterizo Santa Rosa, Tacna, Perú en Google maps]*. Obtenido de https://www.google.ca/maps/place/Complejo+Fronterizo+Santa+Rosa/@-18.0096925,-70.2678016,15z/data=!4m2!3m1!1s0x0:0x85975b433f2fd8a1?sa=X&ved=0ahUKEwjxmsHKnbjQAhVS4GMKHcbIDckQ_BlliwEwDQ
- Group, B. I. (2011). *A report for the Government Construction Client Group: Building Information Modelling (BIM) Working Party Strategy Paper*. Department of Business, Innovation and Skills , Londres.
- Howell, G. (1999). What is Lean Construction? *Proceedings Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, (págs. 1-10).
- Kenley, R., & Seppänen, O. (2010). *Location-Based Management for Construction: Planning, Scheduling and Control*. Taylor & Francis.
- Kenly, R., & Seppänen, O. (2009). *Location-Based management of construction projects: Part of a new typology for project scheduling methodologies*. Austin, TX.
- Khanzode, A., Fischer, M., Reed, D., & Ballard, G. (2006). *A Guide to Applying the Principles of Virtual Design & Construction (VDC) to the Lean Project Delivery System*. Stanford: CIFE Working Paper.
- Koskela, L. (2000). An Exploration towards a Production Theory and its Application to Construction. *VTT Building Technology*.
- Koskela, L., Ballard, G., & Tommelein, I. (2002). The foundations of lean construction. *Design and Construction: Building in Value*, 211-226.
- Kymmell, W. (2008). *Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations*. McGraw Hill Construction.
- Lahdou, R., & Zetterman, D. (2011). BIM for Project Managers: How project managers can utilize BIM in construction projects (Master of Science Thesis). Göteborg, Sweden.
- Larson, E., & Gray, C. (2011). *Project Management: The Managerial Process*. New York: McGraw-Hill.
- Lee, G., Sacks, R., & Eastman, C. (2006). Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system. *Automation in Construction*, 758-776.

- Lin, Y. C., & Su, Y. C. (2013). Developing mobile- and BIM-based integrated visual facility maintenance management system. *The Scientific World Journal*.
- Linnik, M., Berghede, K., & Ballard, G. (2013). An experiment in takt time planning applied to non-repetitive work. *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2013*, (págs. 546-555).
- Lumsden, P. (1968). *The Line-of-Balance method*. London: Pergamon Press Limited: Industrial Training Division.
- Marsh, E. R. (1975). The harmonogram of Karol Adamiecki. *Academy of Management Journal*, 358-364.
- Mihindu, S., & Arayici, Y. (s.f.). Digital Construction Through BIM Systems Will Drive the Re-engineering of Construction Business Practices. *12th International Conference of Information Visualization*. London.
- Murguía, D., Brioso, X., & Pimentel, A. (2016). Applying Lean techniques to improve performance in the finishing phase of a residential building. *24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, (págs. 43-52). Boston, MA, USA.
- Oberlender, G. (2000). *Project management for engineering and construction*. Boston: McGraw-Hill.
- O'Brien, J. J., & Plotnick, F. L. (2010). *CPM in Construction Management*. McGraw Hill.
- Olivieri, H. (2017). Interview to Hylton Olivieri about repetitive and non-repetitive projects and LBMS. (A. Urbina, Entrevistador)
- Oti, A., Kurul, E., Cheung, F., & Tah, J. (2016). A framework for the utilization of Building Management System data in building information models for building design and operation. *Automation in Construction*, 195-210.
- Pärn, E., Edwards, D., & Sing, M. (2017). The building information modelling trajectory in facilities management: A review. *Automation in Construction*, 45-55.
- Pimentel, A. (2016). *Problemática en la etapa de acabados de edificios multifamiliares y recomendaciones para mejorar la confiabilidad de la programación (Tesis de pregrado)*.
- Popov, V., Mikalauskas, S., Migilinskas, D., & Vainiūnas, P. (2006). Complex usage of 4D information modelling concept for building design, estimation, scheduling and determination of effective variant. *Technological and Economic Development of Economy*, 91-98.
- Project Management Institute. (2013). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)*. Newtown Square, PA: PMI Publications.
- Pučko, Z., Natasa, S., & Uros, K. (2014). Building Information Modeling Based Time and Cost Planning in Construction Projects. *Organization, Technology and Management in Construction. An International Journal*, 958-971.
- Rodríguez, N. (2013). *Optimization of Flowline Scheduling vs. Balanced Resources and Task Continuity*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim.
- Russell, D., Cho, Y., & Cylwik, E. (2014). Learning Opportunities and Career Implications of Experience with BIM/VDC. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 111-121.

- Seppänen, O. (2009). *Empirical research on the success of production control in building construction projects (Dissertation for the degree of Doctor of Science)*. Helsinki University of Technology, Faculty of Engineering and Architecture, Helsinki.
- Seppänen, O. (2014). A comparison of Takt time and LBMS planning methods. *22nd Annual Conference of the Int'l. Group for Lean Construction*. Oslo, Norway.
- Seppänen, O. (2017). Interview to Olli Seppänen about repetitive and non-repetitive projects and LBMS. (A. Urbina, Entrevistador)
- Seppänen, O., & Kankainen, J. (2004). An empirical research on deviations in production and current state of project control. *12th Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction*. Helsingor, Denmark.
- Seppänen, O., Ballard, G., & Pesonen, S. (2010). The Combination of Last Planner System and Location-Based Management System. *Lean Construction Journal*, 44-54.
- Seppänen, O., Evinger, J., & Mouflard, C. (s.f.). Effects of the location-based management system on production rates and productivity. *Construction Management and Economy*, 608-624.
- Serrador, P. (2012). *The importance of the planning phase to project success*. Paper presented at PMI Global Congress 2012-North America, Vancouver, British Columbia, Canada. Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- Shi, W. (2009). *Framework for integration of BIM and RFID in steel construction*. University of Florida, Florida. Obtenido de http://etd.fcla.edu/UF/UFE0041169/shi_w.pdf
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 357-375.
- Tian, Z. (2016). *Introduction to Project Management 2 [PowerPoint slides]*.
- Urbina, M. (11 de Julio de 2016). Entrevista a Miguel Urbina. (D. Dueñas, & A. Urbina, Entrevistadores)