

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo
secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de
noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano
MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



LEAN-BIM EN EDIFICACIÓN VERTICAL. MEJORA DE GESTIÓN DE PROYECTOS HACIA LA SUSTENTABILIDAD: CASO DE ESTUDIO EN ZAPOPAN, JALISCO.

Caso de estudio que para obtener el grado de
Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables

LGAC: Eficiencia en el uso de recursos naturales y energéticos

Presenta: **ARQ. IANINA ZAMBRANO FLORES**

Tutor **DR. JOSÉ MANUEL FALCÓN MERAZ**

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. 06 de julio de 2020.

RESUMEN

Palabras clave: *Lean-BIM, metodología, gestión de recursos, sustentabilidad, vivienda en serie.*

Este proyecto de investigación se centró en un análisis comparativo entre la gestión realizada para la construcción de un caso de edificación de vivienda vertical en serie en Zapopan, Jalisco, con la aplicación de metodologías Lean Y BIM, mediante la herramienta conocida como Gemba Walk, con el propósito de conocer las situaciones, actividades o problemas que generen consumos adicionales de recursos para la construcción, para responder así a la pregunta ¿Qué beneficios se obtienen al implementar una gestión de proyectos de construcción que haga uso de la sinergia obtenida al utilizar las metodologías Lean y BIM?.

La información recopilada para este proyecto provino de la observación directa utilizando la herramienta Gemba Walk (mirar, escuchar y preguntar), propia de la metodología Lean y de fuentes primarias basadas en la documentación otorgada por el desarrollador del proyecto del caso de estudio. Posteriormente se identificaron y agruparon las principales problemáticas encontradas, de acuerdo con su tipo y se procedió a hacer un análisis y diagnóstico mixto que nos permitiera conocer en que momento del proceso constructivo se pudieron haber prevenido las problemáticas mencionadas y cuál fue el impacto económico, social y ambiental producido.

Entre los resultados se encontró que a pesar de que el caso de estudio consiste en un proyecto edificatorio de gran escala, su gestión responde a una edificación tradicional de escala menor, sin observar que es un proyecto de gran volumen que contiene elementos de producción en serie. Finalmente se emiten algunas recomendaciones basadas en las metodologías Lean y BIM, para disminuir el impacto social y ambiental, además del económico en este tipo de construcciones.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación no hubiera sido posible sin el apoyo de los programas de fomento a la educación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), en coordinación con el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO).

Agradezco el apoyo incondicional de mi hermano, Héctor García, principal promotor de todas mis locuras, así como el amparo de mis tíos, Raúl Payán y Araceli Venegas, quienes fueron mi faro de luz en las noches más oscuras.

De igual forma agradezco a Patricia Sánchez, quien me alentó a entrar en esta maestría, me ayudó cuando enfermé y me motivó a continuar a pesar de las adversidades.

A mis compañeros y compañeras con quienes compartí la visión, el amor y respeto por todos los componentes de la esfera llamada tierra. Compañeros que hoy puedo llamar amigos.

A Carlos García, quien me facilitó la entrada al sitio de construcción y me proporcionó la información necesaria para completar mi TOG; así como a Sandra Beltrán y a Elvia Solís, por su apoyo incondicional.

Ianina Zambrano Flores

Índice

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación, supuesto de trabajo y preguntas generadoras.....	4
1.3. Objetivo general y particulares.....	6
1.4. Organización del documento.....	7

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. Construcción tradicional y su evolución.....	9
2.2. Metodología BIM.....	17
2.2.1. BIM en la Construcción.....	22
2.2.2. Adopción mundial de BIM.....	28
2.3. Metodología <i>Lean</i>	31
2.3.1. Construcción <i>Lean</i>	37
2.4. Sustentabilidad en sinergia de Construcción <i>Lean</i> -BIM.....	41
2.4.1. Construcción con elementos prefabricados.....	47
2.5. Casos análogos.....	52

Capítulo 3. Metodología

3.1. Descripción.....	60
3.2. Relevancia del caso de estudio.....	63
3.3. Descripción de las actividades realizadas.....	65

Capítulo 4. Estudio comparativo

4.1. Descripción del caso.....	67
4.2. Investigación de campo y diagnostico.....	73
4.2.1. Estudio de proyecto ejecutivo y los problemas asociados al mismo.....	76
4.3. Investigación del sitio de construcción.....	83
4.3.1. Seguridad e higiene.....	84
4.3.2. Manejo de inventarios.....	87
4.3.3. Uso de los recursos.....	89
4.3.4. Desperdicios.....	92
4.3.5. Gestión de residuos.....	102
4.4. Potencial para prefabricados.....	103
4.5. Análisis y discusión.....	105
4.5.1. Gestión del proyecto.....	105
4.5.2. Seguridad e Higiene.....	110
4.5.3. Manejo de inventarios.....	111
4.5.4. Uso de los recursos y su gestión como residuos.....	112

Capítulo 5. Propuesta de gestión

5.1. Descripción.....	113
5.2. Etapa de Diseño.....	119
5.2. Etapa de preconstrucción.....	120

5.4. Etapa de planeación.....	123
5.4. Etapa de ejecución.....	124
5.5.1. Seguridad e Higiene.....	126
5.5.2. Control de Calidad.....	127
5.5.3. Construcción.....	129
5.5.4. Gestión de materiales.....	130

Capítulo 6. Conclusiones generales y líneas de investigación futura

6.1. Conclusiones generales.....	132
6.2. Estado del arte.....	133
6.3. Herramientas empleadas en el caso de estudio.....	134
6.4. Impactos y beneficios ambientales.....	137
6.5. Líneas de investigación futura.....	139

Referencias.....	141
-------------------------	------------

Capítulo1 - Introducción

1.1. Introducción

El reporte del IPCC 2014, menciona que el crecimiento económico y de la población a nivel mundial, sigue siendo el motor más importante del aumento de las emisiones de CO₂ provenientes de la combustión de combustibles fósiles. Tan solo en México, la población en el 2010 de acuerdo con el Censo Nacional del INEGI era de 112.3 millones de habitantes, cifra que en 1970 alcanzaba tan solo 48.2 millones (INEGI, s.f.). En ese sentido, de conservar ese ritmo, en 2030 rebasará a Rusia, calculada en 137 millones de pobladores (López, 2018b).

A nivel estatal, de las 32 entidades federativas de México, Jalisco se encuentra en cuarta posición con 8,197,483 habitantes, al primero de julio del 2018. Su mayoría radicando en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) y donde en los últimos siete años se ha tenido un crecimiento poblacional del 10.7% anual y se estima que aumente a un 14.8% (IIEG, 2018). Este crecimiento poblacional, genera la necesidad de proporcionar servicios básicos como es el caso de la vivienda, donde se pronostica que para el año 2030, se generará un incremento del 56% al inventario inmobiliario existente del año 2005 (Partida, 2008). IIEG (2018) afirma que, en el caso de Jalisco en 2005 se tenía un millón 559 mil viviendas particulares habitadas, estimándose que hacia el 2030 se tendrán 907 mil hogares adicionales, lo que provocará la necesidad de edificar 874 mil viviendas adicionales a las de 2005.

La industria de la construcción, encargada de la edificación de estas viviendas y la causante de fuertes impactos ambientales, por ser un gran consumidor de recursos naturales, así como generador de residuos. El 40% de las materias primas en el mundo, que equivalen a 3,000 millones de toneladas por año, son destinadas para la construcción (WorldGBC, 2019).

Este valor asciende a un 70% si se considera el uso del agua, la tierra y el total de recursos madereros, así como el consumo de un tercio de la energía que se produce en el mundo. Además, un 20% de esta energía, es consumida durante el proceso de construcción, elaboración de materiales y demolición de las obras de construcción (WorldGBC, 2019).

Por lo tanto, al existir un incremento en la cantidad de viviendas por construir, también se genera un incremento en el impacto ambiental por el uso de recursos materiales para la fabricación, transporte de materia prima, así como de la disposición final de los residuos generados durante la construcción. Este incremento, genera un desgaste en el medio ambiente, debido a que tan solo la producción de un metro cuadrado de materiales de una edificación estándar, puede suponer la inversión de una cantidad de energía equivalente a la producida por la combustión de más de 150 litros de gasolina. Cada metro cuadrado construido conllevaría una emisión media de 0.5 toneladas de dióxido de carbono y consumo energético de 1600 kW/h, considerando solamente el impacto asociado a los materiales (Scarpellini *et al.*, 2014).

En 2010, el 35% de las emisiones directas de los gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmosfera, provinieron de la producción de energía (*e.g.* 30 giga-toneladas de dióxido de carbono) y de continuar con ese ritmo, las aportaciones por el uso de combustibles fósiles, incluyendo el uso de energía en el transporte, industria y los edificios, contribuirían 55–70 Gt de CO₂ al año hacia 2050 (WorldGBC, 2019).

En el caso de México, de acuerdo con estimaciones de la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013, tan solo en la capital mexicana se generan diariamente 7,000 toneladas de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), de los cuales solo se aprovecha el 3% en reciclaje y 1% en reúso (CMIC, 2013, p.17). A nivel nacional, la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) indicó una generación anual estimada de 6 millones de

toneladas de RCD para el 2011, equivalente a una producción diaria de 17,000 toneladas (CMIC, 2013, p.15). Con una generación estimada de 9.9 millones de toneladas para el 2018, es decir, 27,000 toneladas diarias, a un crecimiento de la industria del 5.0% anual. (CMIC,2013, p.16)

En un estudio de SEMARNAT (2009), titulado: “Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generados por las actividades de construcción en México”, se indica que la generación de los RCD representa, en peso promedio, el 17.5% de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), con una problemática que se incrementa de manera proporcional al índice de crecimiento poblacional.

Otro problema que se presenta es la falta de optimización de los proyectos por el uso de sistemas constructivos tradicionales, con productos de dimensiones estandarizadas que hacen necesaria la adaptación in situ, lo que genera un gasto excesivo de recursos y materias primas, así como una mayor producción de residuos. Al hacer una comparativa histórica con la forma en que el desarrollo técnico que precedió a griegos y romanos, fue interrumpido debido a la gran cantidad de mano de obra de que disponían por el uso de esclavos. De igual forma, la gran cantidad de fuerza laboral a bajo costo que existe en México ha inhibido el desarrollo de nuevas tecnologías, favoreciendo la continuidad de las más tradicionales (Martínez, 2009).

Una de las principales razones es debido al costo de la mano de obra, que en México es relativamente barato, lo que desincentiva el uso de prefabricados y promueve los sistemas constructivos tradicionales, evitando una evolución natural en la búsqueda de alternativas para disminuir costos, materiales de deshechos y mano de obra, que al mismo tiempo sean amigables con el medio ambiente. Lo contrario ocurre en los países europeos, donde el elevado costo de la mano de obra ha impulsado el avance en la invención y uso de técnicas mecanizadas para reducirla, lo que además ha impactado al medio ambiente de forma positiva (Martínez, 2009).

Aunque existen y se han implementado algunos modelos para mejorar la productividad en la construcción desde la metodología *Lean*, se ha utilizado el modelado de la tecnología junto con la metodología BIM (*Building Information Modeling*) para una mejor planeación de la ejecución de los proyectos de construcción e incluso se han manejado modelos de interacción de ambos. La investigación que se ha abordado desde el punto de vista de la sustentabilidad ha sido muy escasa, en donde se busquen preservar los recursos naturales y tratando de perturbar en menor medida a la naturaleza.

A pesar de que existe esta posibilidad, en México la industria de la construcción no ha evolucionado al ritmo de las demás industrias, manteniendo procesos que en la actualidad podrían calificarse como artesanales, debido principalmente a la falta de difusión que existe sobre técnicas industriales, lo que provoca su desconocimiento por parte de arquitectos, ingenieros y contratistas.

1.2. Justificación, supuesto de trabajo y preguntas generadoras

Al contemplar los factores descritos en la [Sección 1.1](#), se vuelve de primordial importancia buscar nuevas opciones que ayuden al mejor aprovechamiento de los materiales utilizados en la construcción, así como buscar reducir los residuos y las emisiones de CO₂ generadas por la misma.

Es por ello, que el TOG se enfoca en hacer uso de la sinergia entre dos metodologías *Lean* y BIM, así como buscar utilizar alternativas que permitan controlar o disminuir variables, como es el caso de los prefabricados, con la finalidad de optimizar el uso de los recursos, reducir o eliminar residuos de construcción y reducir las emisiones de CO₂ por transportes de materiales y residuos, desde la etapa de diseño hasta la construcción. La sinergia de estas dos metodologías que, aunque por sí solas logran tener mejoras en la eficiencia de procesos dentro de la industria de la

construcción, cuando se utilizan en conjunto, las aportaciones que generan pueden significar un impacto considerable, tanto ambiental como económico.

Al tener en cuenta las posibles sinergias que la combinación de estas dos metodologías pueden proporcionar, la finalidad del TOG es el de explorar y explotar los posibles potenciales que estas dos herramientas pueden proporcionar para una mejor ejecución de la construcción de vivienda vertical en Guadalajara, así como determinar sus limitaciones.

Es necesario, aplicar nuevas alternativas en la industria de la construcción, como la sinergia de estas metodologías, las cuales no incrementarían significativamente los costos de producción, donde se podrían generar reducciones importantes en favor el medio ambiente, que pueden ir desde un 35% en las emisiones de CO₂, un ahorro del 30 al 50% de energía y ahorro en el consumo de agua. Asimismo, el uso de estas prácticas podría permitir una disminución de hasta el 90% de los costos por disposición de residuos sólidos, lo que hace que sea este ámbito el que más potencial tenga para reducir sus impactos negativos al medio ambiente (IPCC, 2007 y WorldGBC, 2008).

Como *supuesto de trabajo* se tiene que por medio de una gestión de proyectos de construcción que incluya herramientas de las metodologías Lean y BIM, se pueden obtener proyectos integrales que beneficien a las tres vertientes del desarrollo sustentable, al reducir consumos de recursos ocasionados por una mala gestión, la generación y gestión inadecuada de residuos y al mejorar las condiciones que puedan propiciar daños a la salud de los trabajadores.

Como preguntas generadoras se tienen:

- ¿Qué beneficios se obtienen al implementar una gestión de proyectos de construcción que haga uso de la sinergia obtenida al utilizar las metodologías Lean y BIM?
- ¿Cuáles herramientas debe tener el modelo de gestión de proyectos de construcción para lograr beneficiar a las tres vertientes de la sustentabilidad?

- ¿Cuáles son los problemas que generan consumos adicionales de recursos y la generación de residuos y en cuales etapas ocurren?
- ¿Cuáles son las situaciones laborales que podrían afectar la salud de los trabajadores?

1.3. Objetivo general y particulares

Objetivo general:

Crear un modelo de gestión de construcción, que, al aplicarse en proyectos de edificación de vivienda en serie, haciendo uso de la sinergia producida entre las metodologías *Lean* y BIM, genere beneficios ambientales, económicos y sociales.

Objetivos particulares:

- Identificar y seleccionar las herramientas con mayores beneficios en la sinergia *Lean* y BIM, que, de acuerdo con sus funciones principales, ayuden a reducir consumos de recursos adicionales, reduzcan la generación de residuos, propicien mayor seguridad a los trabajadores y se reduzcan gastos económicos.
- Identificar los principales problemas que propicien consumos adicionales de recursos, la generación de residuos y las etapas en las que ocurren.
- Identificar los principales riesgos laborales que podrían afectar la salud de los trabajadores.

Este Trabajo de Obtención de Grado (TOG), se trata de un proyecto de investigación profesionalizante de desarrollo o innovación del tipo mixto, donde se recabará información y se formulará un supuesto inicial de trabajo, sobre un fenómeno de tipo científico y social. Con una propuesta de interacción de dos metodologías que promueven diferentes beneficios pero que, al

hacer uso de sus herramientas, ayude a reducir el consumo innecesario de los recursos utilizados, los residuos generados por la misma, mejorar las condiciones laborales de los trabajadores y como consecuencia lograr un beneficio económico. Aplicable para la construcción de vivienda vertical en serie, dentro del municipio de Guadalajara en el estado de Jalisco.

Será de tipo mixto, dado que se establecerá un supuesto inicial de trabajo, donde se diseñará un plan para estudiar la situación-problema de un caso de estudio y se determinarán los conceptos de mayor incidencia en los que pueda influir la aplicación de las metodologías incluidas en este supuesto y que su aplicación nos lleve a obtener beneficios para el Desarrollo Sustentable. Teniendo un nivel explicativo que nos ayudará a dar cuenta de las causas o factores que determinan un fenómeno de la realidad, en el caso específico, se indica cuál es el impacto alcanzado por estrategias en la gestión la de construcción, que sean más eficientes que las utilizadas en el caso de estudio.

1.4. Organización del documento

El presente Trabajo de Obtención de Grado está organizado en cinco capítulos para facilitar el entendimiento correcto del caso de estudio. En el primer capítulo se hace una descripción introductoria en la que se presentan las metodologías efectuadas, para posteriormente describir cual es la situación del problema actual y plantear una posible solución. A continuación, se construye la pregunta de investigación y se establece el objetivo general y sus particulares. En el capítulo 2 se desarrolla la investigación encontrada en la literatura para la generación del estado del arte, incluyendo antecedentes y presentando casos análogos a manera de ejemplos representativos para medir la potencialidad del TOG. Más adelante se genera la discusión sobre la

interacción de tecnologías con metodologías desarrolladas en el sector productivo, así como su aplicación en otros sectores compatibles, como lo es la construcción y su aportación en la sustentabilidad. En el capítulo 3 se muestra la metodología que se utilizó para realizar el presente TOG, las consideraciones que se tomaron para el desarrollo de un estudio comparativo, así como las herramientas que se utilizaron para la obtención de datos a utilizar en la comparativa.

En el capítulo 4 se realiza la descripción general del caso de estudio, así como las etapas contempladas para el proceso comparativo, junto con la evaluación de las situaciones en las que se observaron gastos adicionales de recursos. Después, en el capítulo 5, se generó una propuesta de gestión, aplicándose técnicas aunadas a las herramientas y metodologías desarrolladas en el estado del arte, para la generación de resultados potenciales en la implementación de dichas técnicas. Se realizó la comparativa correspondiente al caso real contra la aplicación de todas las herramientas desarrolladas, especificando los alcances de cada una de ellas. Finalmente, en las conclusiones, se definieron los porcentajes de eficiencia obtenidos por cada herramienta junto con las conclusiones generales del TOG y se generaron líneas de investigación futura.

Capítulo 2 - Estado del arte

2.1. Construcción tradicional y su evolución

Se conoce que la construcción es una de las actividades más antiguas en la historia, donde los materiales junto con los métodos constructivos, se desarrollaron con la evolución de las civilizaciones. Los primeros materiales en ser implementados fueron los más simples, donde se utilizaban recursos locales, como las tierras existentes entre los ríos Tigris y Éufrates de la antigua Mesopotamia, para la elaboración artesanal de bloques utilizando moldes de madera, configurando los primeros ladrillos (Escuela de Diseño de Madrid, 2018).

También, la piedra junto con la madera, se utilizaron desde el comienzo de las civilizaciones, destinando los más duraderos a las edificaciones religiosas, mientras los más sencillos se utilizaban para las construcciones de casa habitación, por una cuestión de economía, facilidad para adquirir los materiales y la rapidez en la construcción (Escuela de Diseño de Madrid, 2018).

Egipto, una de las primeras civilizaciones que cobraron importancia en la antigüedad, fue capaz de explorar con otros materiales al contar con esclavos como mano de obra principal, al no tener que escatimar recursos para la extracción y transporte de estos (Kivilcim and McAlister, 2008 y Escuela de Diseño de Madrid, 2018). Lograron realizar edificaciones impresionantes para el desarrollo de esos tiempos, logrando la construcción de majestuosas pirámides (Fig. 2.1a).

Roma continuó utilizando la piedra, la madera y el ladrillo, así como una especie de concreto, que usaban para rellenar las cavidades de los edificios, mientras destinaban los primeros para las capas exteriores de las paredes. Este concreto, se formaba a base de escombros y mortero, lo cual lo hacía abundante y de bajo costo (Bogue, 1927).

Los Romanos, destacaron por el conocimiento adquirido de múltiples civilizaciones, al haber sido una importante ciudad cosmopolita, desarrollando técnicas innovadoras que les permitían mover grandes piezas de materiales, mediante la fabricación de grúas capaces de elevar hasta 100 toneladas de peso (Escuela de Diseño de Madrid, 2018). Con la edificación de grandes sistemas de irrigación, los sistemas de acueductos (Fig. 2.1b), reconocidos ampliamente por sus sorprendentes dimensiones tanto como su capacidad de funcionamiento.



a)



b)

Figura 2.1. Edificaciones representativas de civilizaciones antiguas: a) Pirámides en Giza, Egipto (Kivilcim and McAlister, 2008) y b) Pont du Gard, Francia (Stutzman. 2001).

Sin embargo, la evolución de los materiales no avanzó como las tecnologías utilizadas; siendo el ladrillo, la madera, la piedra, así como las arenas, los materiales más utilizados durante los grandes periodos de la historia. En las últimas décadas, los avances científicos permitieron introducir una gran gama de nuevos materiales, cuya resistencia y bajo peso, han permitido realizar construcciones más grandes y duraderas. No obstante, el ladrillo, la piedra y la madera, siguen siendo la base de la mayoría de los sistemas constructivos tradicionales en algunos países, como México.

Dentro de las razones por las cuales existe este estancamiento en México, se encuentran la cultura y las circunstancias económicas. Estos sistemas tradicionales de construcción, son ampliamente aceptados en la mayor parte del País, debido a la abundancia de materiales existentes, a la disponibilidad de mano de obra y el costo beneficio que resulta al contrastar entre utilizar métodos más avanzados (*e.g.* invirtiendo mayores recursos económicos, o usar el recurso humano) además del bajo costo que interviene en la mano de obra (López Flores, 2018, p. 45 y 46).

Las técnicas constructivas tradicionales de infraestructura, generan un desgaste por la extracción descontrolada de materiales, provocando un impacto insostenible del medio ambiente, como contaminación del agua, deforestación, erosión del suelo junto con la contaminación del aire, que en conjunto generan consecuencias negativas para el medio ambiente y la calidad de vida de las personas. En la Figura 2.2, se aprecia la construcción de una cancha de usos múltiples, en su etapa de nivelación para el desplante de la losa de concreto. En esta, el proyecto indicaba una altura específica, que, para alcanzarla era necesaria la intervención de una gran cantidad de material de relleno.



Figura 2.2. Uso excesivo de recursos pétreos para el relleno de una cancha de usos múltiples.

Además, la construcción tradicional, representa graves problemas medioambientales, debido a que es considerada como la actividad principal de generación mundial de GEI, de generación de residuos sólidos y de agentes contaminantes (Mascareña, 2005). En 2004 estas emisiones alcanzaban 8.6 billones de toneladas, que al proyectarlas para el año 2030, se superarán los 15 billones de toneladas en caso de continuar la modalidad de construcción actual (UNEP-SBCI, 2006). Asimismo, la construcción es responsable de la generación del 30% de los residuos sólidos mundiales, en conjunto con el 33% de emisiones de CO₂; lo que demuestra la gran necesidad de generar métodos y aplicar prácticas que reduzcan la cantidad de residuos y lograr una disminución de estas emisiones (WorldGBC, 2019).

Un claro ejemplo de la generación descontrolada de los residuos sólidos en México, se encuentra dentro del mismo Plan de Manejo de RCD del País (Fig. 2.3a). En este, aun no se ha resuelto la gestión de los residuos especiales, como los derivados de las actividades de la construcción, el cual menciona que:

En México son pocas las entidades que cuentan con infraestructura para proporcionar un manejo adecuado de los residuos de construcción siendo tan solo un 20% los que terminan en estos sitios y el resto se va directamente a suelos de conservación, sitios clandestinos o vía pública, causando con esto diversos problemas ambientales, que van desde la contaminación del suelo y subsuelo e incluso de acuíferos, focos de contaminación por mezcla de residuos, proliferación de polvo, entre otros (CMIC, 2013, p.4).

Además, en México, la norma NOM-161-SEMARNAT-2011, contempla la obligación de los constructores que generen más de 80 m³ de residuos en cada una de sus obras, crear la

formulación y el desarrollo del plan de manejo de RCD (CMIC,2013). Sin embargo, esto no les obliga a crear un plan de reducción de residuos, ni de optimización de proyectos, por lo que suelen terminar en tiraderos clandestinos sin la supervisión de alguna autoridad (Fig. 2.3b). Esto vuelve urgente la modificación de la visión de quienes participan en la industria de la construcción, así como los organismos de normalización y legislaciones al respecto.



Figura 2.3. Generación excesiva de residuos en la construcción: a) movimiento de desperdicios y b) tiradero de residuos de construcción sin regulaciones de ley (Allen, 2016).

Es necesario introducir nuevas metodologías que sean aplicadas tanto a la habitabilidad como a la sustentabilidad, para introducir una mejora constante que contemple la gama de materiales y mecanismos que surgen de la globalización, así como seleccionar propuestas de nuevos mecanismos de edificación (López Flores, 2018). Con el avance de los sistemas constructivos, han surgido nuevas necesidades, como la de equilibrar el consumo de materias primas con el consumo de energía.

Por su naturaleza, algunos materiales pueden ser recuperables, independientemente de sus escases, como la madera. Por otro lado, la piedra, una vez cortada no puede recuperar su forma original, por lo que no es recuperable. La gestión actual de proyectos, se encuentra basada en la

administración de actividades con la planeación de tiempos de entrega o ciertos porcentajes de cumplimiento para fechas específicas, utilizando como herramientas principales itinerarios o agendas de trabajo, diagramas de *Gantt*, de *Pert* y generación de la ruta crítica. Con este tipo de gestión, se generan factores de inestabilidad del proyecto, al presentarse situaciones complejas, incertidumbres, proyectos acelerados por la fecha de entrega, solicitudes adicionales de los clientes en tiempos diferidos, propicia la presencia de errores de obra y necesidad de realizar reparaciones o adecuaciones, entre otros.

Estos factores, generan la complicación en comunicación de los agentes involucrados para cada una de las etapas constructivas. Esto se debe a que el trabajo entre y dentro de los avances, está conectado al trabajo en otros a través de recursos compartidos y/o depende del trabajo en progreso en otros. Por lo tanto, la coordinación de proyectos en dicho entorno no puede garantizarse, inclusive con cronogramas de métodos de ruta crítica muy detallados (Aziz and Hafez, 2013). Es decir, que, cada agente se concentra solamente en su proceso específico, sin contemplar los procedimientos anteriores ni los que dependerán en un futuro al terminar dicho proceso. Los gerentes de proyecto que dependen de estos cronogramas luchan con la incertidumbre, al impedirles apreciar todas las posibles complicaciones que pudieran presentarse en los procesos, debido a su dependencia de la programación de tareas y el control de actividades (Aziz and Hafez, 2013).

A diferencia de otras industrias, la construcción, es una industria en la que cada producto es diferente, es decir, ningún proyecto es o será igual a otro. En esta diferencia influyen aspectos como variabilidad de los materiales, variabilidad de la mano de obra, variabilidad del clima, variabilidad de la tecnología, etc. Esta condición particular hace que cada proyecto de construcción sea único y especial.

Sin embargo, hay generalidades que es posible aplicar a cada proyecto con el objetivo de mejorar los procesos y, por ende, el producto final (Leandro, 2008). Es decir que, es necesario aplicar metodologías que ayuden a mejorar la productividad, la optimización y los despilfarros que en un sistema tradicional de producción, control y gestión de proyectos de diseño y construcción no han logrado impactar significativamente (Pons, 2019).

En los últimos 50 años, la industria de la construcción ha tenido un puñado de notables innovaciones tecnológicas en comparación con otras industrias. Con avances en investigación de materiales, metodologías de instalación y eficiencia energética, tales como prefabricación, materiales ecológicos y diseño de edificios ecológicos. Sin embargo, las tecnologías utilizadas por los equipos de proyecto para la gestión de la construcción, siguen siendo en gran medida las mismas que hace 30 años (Hardin and McCool, 2015).

Por otro lado, algunos países, han desarrollado una gran variedad de metodologías y herramientas para potenciar la gestión de todas las etapas involucradas en el proceso constructivo. Comenzando desde los principios del diseño, con las proyecciones preliminares de un proyecto, hasta la posibilidad de apreciar el estado de operación de este, con la adaptación de escenarios en un entorno gráfico gracias a los avances de las últimas décadas en las Tecnologías de Información (TI). Estos avances aportan soluciones a la industria de la construcción, mejorando los procesos, permitiendo la automatización, mecanismos efectivos de toma de decisiones y contribuyen a la evolución de las formas actuales de trabajo. A manera de contraste a lo anterior, se presenta la Figura 2.4, donde se aprecia una cronología desde los inicios de la aplicación de técnicas de diseño manuales, seguidas por la incorporación del diseño asistido por computadora, hasta lo que actualmente se conoce como el internet de las cosas.

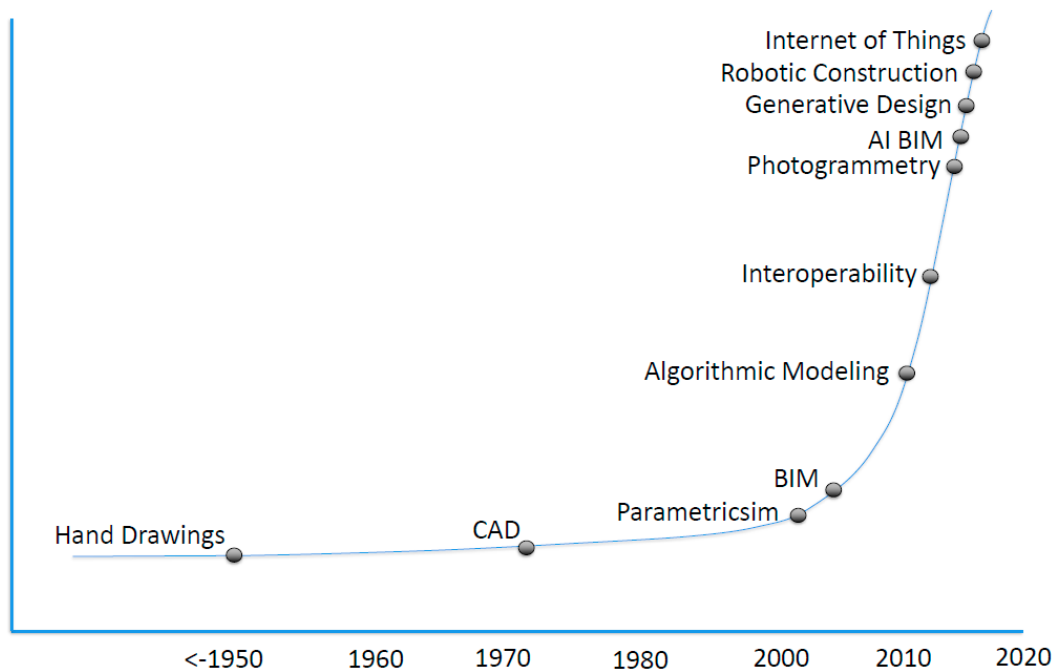


Figura 2.4. Crecimiento de la adopción de nuevas tecnologías y metodologías en la construcción (Allen, 2016).

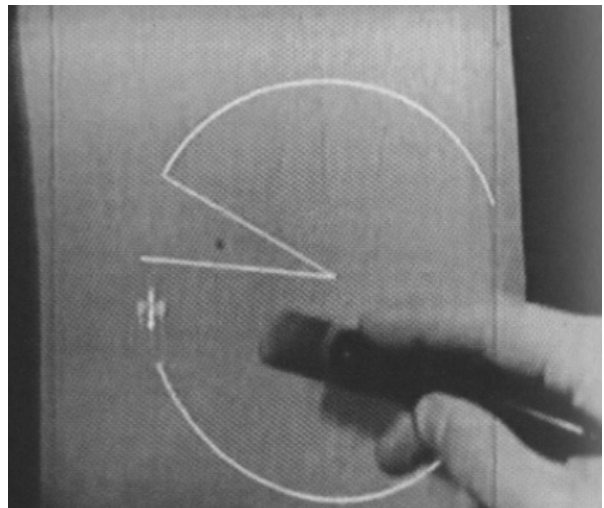
Las innovaciones que se conocen actualmente, presentaron todo un proceso de generación de resultados, con base a proyecciones de prueba y error por más de 30 años (1970-2000). Con todo este campo de experiencias recabadas a lo largo de los años, era de esperarse que otras disciplinas adecuaran herramientas especialmente diseñadas para sus intereses particulares. En las siguientes secciones, se describirán algunas de las metodologías que representan la mayor parte de los avances en la gestión, operación y apreciación de proyectos en la industria en general tanto como en la construcción, por medio de la adopción parcial o completa de las TI enfocadas especialmente en la manipulación de grandes volúmenes de información, que se encuentren al alcance de todos los que integran un proyecto determinado.

2.2. Metodología BIM

En 1963 *Ivan Sutherland* desarrolló el primer sistema de diseño asistido por computadora CAD (*Computer Aided Design*) llamado *Sketchpad* (Fig. 2.5a-b). Pero no fue hasta 1974, cuando *Charles Eastman* (considerado como Padre del BIM), desarrolló el *Building Description System* (BDS), el cual contiene todos los ingredientes actuales de BIM (Fernández and Zamarrón, 2018). En la década de los setenta, *Eastman*, comunicaba su inconformidad con los sistemas utilizados en ese entonces, los cuales trataban de un inmenso catálogo de representaciones en 2D para todos los procesos constructivos, que resultaban ineficientes a la hora de realizar modificaciones por la imposibilidad de una actualización en tiempo real de las mismas. Con el paso de los años, se generaron diversas herramientas informáticas que perseguían la misma visión inicial compartida por *Eastman*, la posibilidad de obtener un entorno gráfico en tiempo real para todas las partes involucradas.



a)



b)

Figura 2.5. Uso del *Sutherland's Sketchpad*: a) *Ivan Sutherland* usando la plataforma en el año 1973 y b) interfaz del *Sketchpad* al dibujar un círculo (Sdegno, 2017).

Comenzando con el desarrollo de la herramienta BDS, considerada como una base de datos para lograr una compleja descripción de edificios para potenciar su diseño y construcción. Esta herramienta, mejoraba la representación de los sistemas de construcción, con atención detallada a las estructuras de datos, el esquema de acceso y el método de interacción entre la base de datos y los programas de análisis. Conjuntamente, en 1977 se introdujo *Graphical Language for Interactive Design* (GLIDE), utilizándose como una herramienta para verificar la precisión de la estimación de costos de datos y la evaluación del diseño estructural. Después, surge el llamado *Building Product Model* (BPM), el cual contemplaba herramientas antecesoras con la aplicación del diseño en conjunto con los procesos constructivos y la participación de los actores involucrados. Más adelante, se implementó el uso del *Generic Building Model* (GBM), donde se integraba toda la información del proyecto junto con las herramientas encargadas del diseño y gestión de la construcción (Latiffi *et al.*, 2014).

Todas las herramientas mencionadas anteriormente, funcionaron como antecedente para la siguiente generación de estas, debido al creciente avance tecnológico que se ha desarrollado las últimas décadas y el aumento en la complejidad de la construcción, fue necesaria una modernización competente utilizando dichas tecnologías. Sin embargo, dentro de ellas, cada aportación en cuanto a su época, fue un esfuerzo por lograr obtener una herramienta capaz de integrar todas las disciplinas involucradas en el proceso constructivo para estar en constante organización, con resultados en tiempo real para todas las partes. Por lo tanto, el conjunto de las herramientas antecesoras y los avances tecnológicos, lograron la implementación de lo que se conoce actualmente como BIM, utilizándose para controlar la información, así como la organización, las tareas y los procesos que se necesitan desde la etapa de planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento (Latiffi *et al.*, 2014 y Leite, 2019).

Por otro lado, además de ser una implementación de herramientas en conjunto de los avances tecnológicos, BIM es considerado como una metodología, que, al interactuar con lo anterior, garantiza el éxito de una plataforma BIM. Dentro de esta metodología, se consideran tres pilares fundamentales, tales como los mismos procesos, la tecnología y los comportamientos (Fig. 2.6). Los primeros, se centran en la innovación constante de procedimientos para facilitar el entendimiento correcto de todos los elementos involucrados para cada etapa de construcción.

Con una minuciosa detección de los conflictos que pudieran generarse al momento de modificar información del proyecto general y evitando largas jornadas de reestructuración. En la tecnología, el constante desarrollo de nuevas herramientas multiplataforma, brinda más y mejores elementos para la gestión de proyectos, así como también, el aumento en las capacidades de las computadoras, en cuanto a procesamiento y calidad gráfica (Hardin and McCool, 2015).

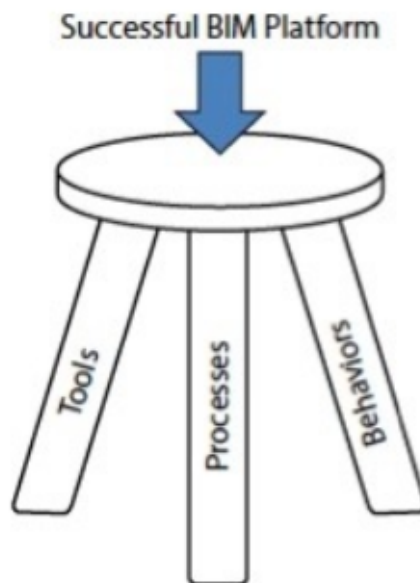


Figura 2.6. Pilares del éxito en una plataforma BIM (Hardin and McCool, 2015).

El comportamiento o aprobación por las partes involucradas, es el tercer pilar, que tiende a ser de mayor dificultad para obtenerse. El núcleo de BIM es mucho más que el software de actualización, es un cambio cultural en la mentalidad en la forma en que colaboran los equipos de gestión de la construcción. Es decir, que, mientras un equipo de trabajo o una organización completa, se niegue a realizar cambios por la implementación de nuevas estrategias, contrastado con las estrategias tradicionales, resultará muy complicada la adopción de nuevas herramientas que pueden representar incremento significativo en la productividad (Hardin and McCool, 2015).

Cabe destacar, que la analogía que se muestra en la Figura 2.6, representa la importancia del conjunto de estos tres pilares para asegurar el correcto funcionamiento de la implementación de la metodología BIM. Junto a estos pilares, se encuentra la tarea de seleccionar la herramienta más adecuada a las características de un equipo de trabajo o una empresa, con la finalidad de obtener resultados significativos a corto y mediano plazo, con la implementación de estas.

El método más acertado para la selección de herramientas BIM, se conforma por tres estrategias que dependen de cada enfoque por separado para la generación de diferentes alcances y resultados. La primera estrategia corresponde al método *pile on*, a manera de incluir nuevas posibilidades de productividad, con la adición de algún software o herramienta simultáneamente a las técnicas actuales. “La intención es que la nueva herramienta se entrelace en el tejido de las herramientas utilizadas dentro de la empresa y, en última instancia, se utilizarán las mejores herramientas, mientras que las demás se desvanecerán” (Hardin and McCool, 2015, p. 5). De esta manera, es posible apreciar la diferencia de cual herramienta es la que genera mayor productividad, sin dejar radicalmente lo que se ha estado haciendo de manera tradicional.

Sin embargo, se debe tener especial cuidado al momento de superponer herramientas, debido a que puede presentarse confusión al momento de definir si su función es indispensable o no, por lo que se vuelve necesaria la pronta adopción o eliminación de estas.

Por otro lado, para la segunda estrategia llamada *swap out*, se genera el remplazó temporal de todas las herramientas actuales por una o un conjunto de nuevas herramientas o técnicas que apuesten por mejorar la productividad a manera de actualización (Hardin and McCool, 2015). De esta forma, se genera un análisis comparativo entre la situación anterior, actual y una proyección futura del posible alcance de su implementación, así como también la posibilidad de implementar extensiones adicionales a dichas herramientas. Cabe destacar, que, al aplicar esta estrategia, se requiere cierto esfuerzo extra por tratarse de un proceso a segundo plano, al generar comparativas en tiempo real de lo que acontece en la producción, por lo que su adopción se torna complicada para empresas con personal limitado.

Para la tercera estrategia, es necesaria la integración de un grupo de trabajo que se enfoque directamente en la detección de problemas en las metodologías actuales, detección de retrasos innecesarios en los procesos y el desarrollo de análisis detallados de los elementos que deben ser optimizados. Este método, llamado *process first*, donde un equipo comienza observando sus procesos actuales y luego pregunta "¿Cómo queremos trabajar?", donde supone que las tecnologías necesarias para permitir esta nueva forma de trabajo estarán allí cuando determinen sus condiciones de trabajo óptimas (Hardin and McCool, 2015). Por lo tanto, la aplicación de esta estrategia, requiere cierto tiempo, dedicación y esfuerzo, traducido en una cantidad considerable de recurso humano, por lo que comúnmente se implementa en grandes y medianas empresas con capacidad de sustentar este tipo de tareas sin perjudicar la producción actual.

Entonces, de acuerdo con lo anterior, cuando un equipo de trabajo o una empresa, dedica una parte de su potencial para la evaluación de posibles incrementos en la productividad, comienza la adopción del tercer pilar para obtener éxito con una plataforma BIM (Fig. 2.6). Estas decisiones, generan una transformación de base tecnológica de manera universal, que propone un cambio a los métodos de trabajo y estrategias de todas las empresas e instituciones mediante el uso de las nuevas tecnologías. Krygiel and Nies (2008) mencionan que BIM es un cambio relativamente reciente en la metodología de diseño y documentación en la industria de la construcción; que incluye información sobre todo el edificio y un conjunto completo de documentos de diseño almacenados en una base de datos integrada, donde toda la información es paramétrica y por lo tanto interconectada.

2.2.1. BIM en la Construcción

El concepto BIM contempla la construcción virtual de una instalación antes de su construcción física real, con el fin de reducir la incertidumbre, mejorar la seguridad, resolver problemas y simular y analizar impactos potenciales. Los subcontratistas de cada especialidad pueden ingresar información crítica en el modelo antes de comenzar la construcción, con oportunidades para prefabricar o preinstalar algunos sistemas fuera del sitio.

Dentro de los principales beneficios se encuentra la reducción en los costos de construcción, mejora en calidad de información de diseño, integración de sistemas de proyectos, datos y equipos; una menor propensión a las órdenes de cambio y gestión de activos de todo el ciclo de vida del proyecto (Krygiel and Nies, 2008; Eastman, 2008; Andrés *et al.*, 2017 y Leite, 2019). También, “al admitir componentes y cálculos más complejos debido a su naturaleza paramétrica y automatizada, BIM puede facilitar significativamente los procesos de evaluación

sostenibles, lo que permite un proceso de toma de decisiones más consistente en las etapas iniciales” (Saieg, 2018 p.308).

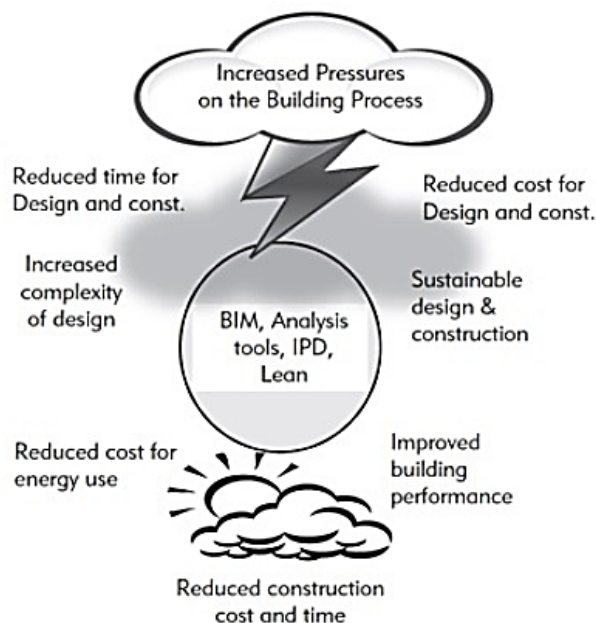


Figura 2.7. Principales beneficios de la implementación de metodologías BIM (Eastman, 2008).

Además de la integración de todos los agentes involucrados en el desarrollo de un proyecto, se presentan múltiples beneficios en aplicación de BIM, como la simulación en 3D frente a representación en 2D (Fig. 2.7). Esto se debe a que un dibujo en 2D de un edificio, es simplemente una representación de la forma final, construida y resumida en planos, donde se representan secciones, elevaciones y en ocasiones, vistas en perspectiva o axonometrías.

En cambio, la simulación 3D va más allá de demostrar cómo se pueden combinar diferentes ensamblajes de edificios en el proyecto. Puede predecir colisiones, mostrar variables ambientales en diferentes diseños de edificios y calcular cantidades de material y tiempo. Esta simulación, presenta precisión frente a estimación al ser capaz de construir virtualmente el edificio antes de

que comience la construcción física en el sitio, agregando un nivel de precisión tanto a las cantidades como a la calidad del edificio que supera los procesos históricos de diseño y documentación. Los materiales de construcción y las variables ambientales se pueden demostrar en tiempo real en lugar de estimarse manualmente. También, genera eficiencia frente a redundancia de elaboración excesiva de planos, simplemente dibujando elementos de construcción solo una vez en el proyecto, en lugar de hacer una planta, alzados y secciones, es posible enfocar ese tiempo adicional en otros problemas de diseño.

Por otro lado, deben considerarse las complicaciones de implementar este tipo de herramientas, traducándose a manera de limitantes, desafíos y cuestiones de adaptación. Esta última, abordada dentro de los tres pilares que aseguran el éxito en la aplicación de la metodología BIM (Fig. 2.6). Dentro de las limitantes, se presenta la capacidad del hardware en los grupos de trabajo, que, mediante aumento de la complejidad del proyecto, aumentaran los requisitos del hardware para asegurar un manejo óptimo de las herramientas del software. Además, de ser necesario un agente altamente calificado, que se encuentre especializado en todas las herramientas que se quieran desarrollar junto con la capacitación correspondiente a todos los elementos del grupo de trabajo.

Los desafíos, con la posibilidad de presentarse errores de operación, relacionados al manejo de múltiples plataformas que pudieran presentar cierta incompatibilidad entre ellas, resultando en tiempos perdidos para dar solución a cuestiones que pudieron atacarse desde un principio, al abordar las limitantes del software tanto del hardware que maneje cada actor. Sin embargo, estas limitaciones, se consideran como estudio de las carencias que pudiera presentar alguna herramienta BIM, que, al manejar todo el conjunto de datos, resulta la continua y constante producción de

mejoras y actualizaciones para mejorar la experiencia en productividad de todas las herramientas utilizadas (Andrés *et al.*, 2017).

BIM, contempla mucho más allá que solo un modelado en 3D. Actualmente, sus herramientas se extienden a lo largo de todas las etapas de un proyecto de edificación, desde el comienzo de la planeación, a la operación y mantenimiento (Tabla 2.1). Inclusive, es posible determinar la vida útil del proyecto, al contemplar una demolición y proponer un procedimiento detallado para generar un porcentaje de reutilización del material producto de demolición (*i.e.* traslados a plantas de separación de elementos para reciclaje).

Tabla 2.1. Principales softwares BIM comerciales, compatibilidad y función en la construcción (Eastman, 2008).

BIM Software	Building System Compatibility	Functionality	Source for information
Tekla Structures	Structural steel, Precast Concrete, CIP reinforced concrete. Mechanical, Electrical, Plumbing, Curtain walls	Modeling, analysis pre-processing, fabrication detailing. Coordination	www.tekla.com
SDS/2 Design Data	Structural steel	Fabrication detailing	www.dsndata.com
StruCAD	Structural steel	Fabrication detailing	www.acecad.co.uk
Revit Structures	Structural steel, CIP reinforced concrete	Modeling, analysis pre-processing	www.autodesk.com/revit
Revit Systems	Mechanical, Electrical, Plumbing and piping	Modeling	www.autodesk.com/revit
3d+	Structural steel		3dplus.cscworld.com/
Structureworks	Precast concrete	Modeling, fabrication detailing.	www.structureworks.org
Revit Building	Curtain walls	Modeling	www.autodesk.com/revit
aSa Rebar Software	CIP reinforced concrete	Estimating, detailing, production, material Tracking, accounting	www.asarebar.com
Allplan Engineering	Structural steel, CIP reinforced concrete, Precast concrete	Modeling, detailing rebar	www.nemetschek.com
Allplan Building Services	Heating, Ventilation, Air-conditioning (HVAC), Mechanical, Electrical, Plumbing (MEP)	Modeling	www.nemetschek.com
Catia (Digital Project)	Curtain walls	Modeling, FEM analysis, parsing production data for CNC	www.3ds.com
Graphisoft ArchiGlazing,	Curtain walls	Modeling	www.graphisoft.com
SoftTech V6 Manufacturer	Curtain walls	Modeling and fabrication detailing	www.softtechnz.com

Para generar cada una de las etapas que comprenden un proyecto, es necesaria la interacción de conocimientos, disciplinas y capacidades, dentro del modelado en 3D. Este conjunto de interacciones, resultan a manera de generación de dimensiones adicionales para un proyecto. Dentro de la literatura, se reportan hasta diez dimensiones correspondientes a estas interacciones, las cuales se tratan del modelado 3D más el conjunto de etapas correspondientes a los tiempos para 4D; los costos para generar 5D; la aplicación de códigos enfocados en el desarrollo sustentable para 6D con la gestión completa de la operación y mantenimiento para desarrollar la 7D; al contemplar todos los factores de seguridad para generar 8D; implementando metodologías de producción manufacturera (*e.g.* metodología *Lean*) lo traslada a 9D y finalmente todas las interacciones anteriores contribuyen para el desarrollo de una construcción industrializada conocida como 10D (Hardin and McCool, 2015 y Melo, 2019). Es decir, cada dimensión aumenta de nivel, conforme se van adicionando etapas adicionales al modelado 3D, con la posibilidad de apreciar todos los comportamientos del proyecto para definir estrategias de mejora o desarrollar la optimización de procedimientos que se reflejarán para todos los actores involucrados de manera inmediata.

La 4D es generada con la adición de los tiempos al modelo 3D, resultado de la sincronización de un modelo con herramientas de planeación, donde es posible generar una simulación con alternativas para lograr la mayor optimización del proyecto sin haber comenzado las labores de trabajo. Con posibilidad de integrar distintos escenarios junto con soluciones para determinar porcentajes de aportaciones o repercusiones y a la par, generando la contribución de todos los actores involucrados. Esto hace posible visualizar y controlar el proceso de acción durante toda la vida del proyecto, para que los contratistas y productores puedan optimizar sus actividades, entregas, gestión de almacenamiento, entre otras.

La 5D se genera con la adición de los costos al conjunto anterior (*i.e.* 4D), lo que permite obtener alzas o bajas en el presupuesto al momento de aplicar modificaciones dentro de la etapa de planeación, dar seguimiento en tiempo real en el avance de los flujos de efectivo en un proyecto y la generación de los costos de operación y mantenimiento (Hardin and McCool, 2015 y Melo, 2019).

Por otro lado, la 6D se produce por la interacción del conjunto anterior (*i.e.* 5D) con la sustentabilidad, aplicando herramientas para realizar análisis energéticos, simulando los alcances de emplear paneles solares, iluminación y ventilación natural, así como también el consumo energético de todos los equipos, aparatos y electrodomésticos que pudiera contener el proyecto (Fig. 2.8a-b).



Figura 2.8. Simulación BIM 6D en un complejo de oficinas: a) estudio de iluminación al interior y b) análisis del confort térmico (McGraw-Hill Construction, 2010).

La interacción 7D, es aquella relacionada directamente con la implementación de los planes de manejo, operación y mantenimiento de un proyecto con el conjunto anterior (*i.e.* 6D), que da la posibilidad de apreciar conflictos probables en un modelo completo, que represente al proyecto en su etapa final, sin la necesidad de esperar hasta llegar a ese proceso en el tiempo determinado.

Además, junto con esta interacción, es posible recabar todas las cuestiones necesarias para garantizar la seguridad en todas las etapas del proyecto (*i.e.* 8D), apreciando cada detalle que pudiera poner en riesgo la integridad del proyecto, tanto estructural como la salud de todo el recurso humano involucrado.

Finalmente, para generar la interacción más completa, comenzando con todos los procedimientos para adentrarse en la industria manufacturera con la implementación de metodologías *Lean* para generar la 9D, para posteriormente, lograr transmitir todos los elementos necesarios junto con la aportación de los requisitos necesarios para lograr la industrialización en la construcción y convertirse en 10D. Se genera la posibilidad de realizar el seguimiento continuo desde la etapa de planeación, a los datos de componentes, especificaciones, procesos o ciclos de mantenimiento, manuales de operación, datos de garantías y la estimada vida útil de cada uno de los elementos del proyecto (Hardin and McCool, 2015 y Melo, 2019). Además, al lograr apreciar todo el conjunto de actores, interacciones y procesos involucrados en un proyecto, es posible definir técnicas de industrialización, para efficientar los procedimientos actuales, hasta llevarlos a una edificación modular, utilizando ampliamente productos prefabricados.

2.2.2. Adopción mundial de BIM

En la última década, se ha impulsado el desarrollo de nuevas plataformas tecnológicas para el modelado virtual de edificios, herramientas para la gestión y control de los proyectos. La implementación de BIM en algunos países, ha experimentado una circulación y adopción relativamente lenta y limitada. Sin embargo, una cantidad considerable de naciones, han comenzado a desarrollar innovación con la adopción de metodologías que generen mayor

productividad en los procesos constructivos. En la **Figura 2.9**, se aprecia una distribución mundial de organismos gubernamentales que han impuesto recientemente medidas que fomentan o inclusive, obligan la utilización parcial o completa, de herramientas y metodologías BIM para cualquier tipo de edificación.



Figura 2.9. Adopción mundial de BIM por parte de organismos gubernamentales. (Crespi, 2019).

En EUA la utilización de BIM en toda la industria aumentó del 28% en 2007 al 70% en 2012; los arquitectos, ingenieros y contratistas presentaron porcentajes similares, con 70%, 67% y 74% respectivamente (McGraw-Hill Construction, 2012).

Reino Unido, en conjunto con el instituto de normalización *British Standards Institution*, indican que los proyectos que asciendan de cinco millones de libras en costos, deben ser desarrollados totalmente con metodología BIM y reducir entre un 20-30% los costos de las obras públicas (Melo, 2019).

En Dinamarca, desde el año 2007 es obligatorio el uso de metodología BIM, además de requerimientos especiales en detallado para proyectos que rebasen los 5.5 millones de euros de

presupuesto. Francia y Alemania junto con España, adoptaron medidas similares a partir del 2014 y 2015 respectivamente, donde estos últimos, son impulsados generalmente por el sector privado (Melo, 2019).

En México, actualmente se ha logrado incluir de manera parcial, la esencia de la implementación de BIM para proyectos de infraestructura. La Fundación de la Industria de la Construcción (FIC) ha estado fomentando la adopción de estas herramientas en la última década con el “BIM *Forum* México”, conformado por un grupo de trabajo que integra los principales grupos del sector construcción, con la finalidad de desarrollar una industria más competitiva. Iniciando en el año 2016, con el primer desarrollo de normativas en la industria de la construcción, con la NMX-000-11-2016-Modelado de Información para la construcción.

Para el año 2017, el organismo ONNCCE generó una normativa para impulsar la aplicación de estas herramientas, bajo el nombre de Modelado de Información de la Construcción (MIC), la cual, tiene como objetivo el brindar especificaciones para implementar el modelado de información en proyectos a través de la elaboración y seguimiento de un plan de ejecución, en proyectos de edificación o infraestructura. También, por parte de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, se generó en 2019, la “Estrategia para la implementación de MIC en México”, con la finalidad de generar la adopción de la metodología BIM dentro de los próximos cinco años (Melo, 2019).

Con estas contribuciones que se han implementado poco a poco en el país, se abre toda una ventana de oportunidades, tanto para nuevos arquitectos, contratistas e ingenieros, como para toda la industria de la construcción actual, con amplias posibilidades de incrementar la productividad, calidad, rendimientos y generar ahorros significativos en cada etapa de un proyecto. Cabe destacar, que, la adopción de esta metodología, se encuentra proyectada para un futuro no muy lejano. Sin

embargo, con el avance de las capacidades de las herramientas al alcance del usuario, cada día es menor la brecha entre el uso normal de metodologías BIM.

2.3. Metodología *Lean*

El pensamiento *Lean* es una serie de métodos y herramientas que pretende eliminar pérdidas por demoras e ineficiencias en los procesos internos de la organización a comparación de la producción convencional (Tabla 2.2). Previene fallas de equipos, interrupciones y pérdidas de producción, acercándose a una perfección de todos los procesos y mejorando la calidad final del producto o proyecto (Rojas *et al.*, 2016).

Tabla 2.2. Producción convencional vs. producción sin perdidas (Campero y Alarcón, 2008).

	PRODUCCIÓN CONVENCIONAL	PRODUCCIÓN SIN PÉRDIDAS
Objeto	Afecta a productos y servicios	Afecta a todas las actividades de la empresa
Alcance	Control	Gestión, asesoramiento, control
Modo de aplicación	Impuesta por la dirección	Por convencimiento y participación
Metodología	Detectar y corregir	Prevenir
Responsabilidad	Departamento de calidad	Compromiso de todos los miembros de la empresa
Clientes	Ajenos a la empresa	Internos y externos
Conceptualización de la producción	La producción consiste de conversiones (actividades) todas las actividades añaden valor al producto	La producción consiste de conversiones y flujos; hay actividades que agregan valor y actividades que no agregan valor al producto
Control	Coste de la actividades	Dirigido hacia el coste, tiempo y valor de los flujos
Mejora	Implementación de nuevas tecnología	Reducción de las tareas de flujo, y aumento de la eficiencia del proceso con mejoras continuas y tecnología

Esta eliminación de perdidas, se encuentra asociada al concepto general de la palabra *Lean*, relacionado directamente a la esbeltez, debido a que surge por ser un sistema que utiliza menos recursos comparado con la producción tradicional. Esta metodología, genera:

La mitad de esfuerzo humano en la fábrica, la mitad de espacio en la fabricación, la mitad de inversión en herramientas, la mitad de las horas de ingeniería para desarrollar un nuevo producto en la mitad de tiempo. Además, requiere mantener mucho menos de la mitad del inventario necesario en el sitio, dando lugar a muchos menos defectos y produce una mayor e incluso creciente variedad de productos (Pons, 2014. p.15).

Esta metodología se implementó por primera vez en conjunto con la producción automotriz de *Toyota Company Motors* y fue llamado “Sistema de producción Toyota” (TPS, por sus siglas en inglés). Con la esencia principal de favorecer una mayor multifuncionalidad y aumentar la productividad, al dividir el trabajo de ensamblaje de automóviles en menor cantidad de operaciones a comparación de la producción convencional, lo que generaba una menor necesidad de especialización del trabajo, por lo que era posible incrementar la mano de obra puntualizada a ciertas tareas en específico. Tanto las múltiples jornadas de trabajo como la rotación de turnos, era sustancialmente mayor en la nueva producción y gran parte de las operaciones se realizaba en pequeños o grandes equipos de trabajo, a diferencia de las fábricas convencionales, donde el trabajo individual era el que representaba mayor aportación a la cadena productiva, siendo esto contrario a la ideología comúnmente adquirida, tras poner en práctica todo el TPS.

Este sistema, utiliza una base cultural de filosofía, que se presenta en las herramientas: *Just-in-Time* (JIT) y el *Jidoka*, con un sustento y perfección a través de interacciones de trabajo estandarizado y la aplicación de la herramienta *Kaizen* o mejora continua, seguido de un plan de acción a través de un ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) (Koskela, 1992).

JIT es un sistema de producción que fabrica y entrega justo lo que se necesita, cuándo se necesita y en la cantidad que se necesita. *Jidoka* es un concepto japonés que significa proveer a las

máquinas y a los trabajadores la habilidad de detectar cuándo ocurre una condición fuera de lo normal e inmediatamente parar el trabajo para identificar la causa de raíz.

El ciclo PDCA, se asocia a un ciclo de mejora continua, basado en el método científico de proponer un cambio de mejora en un proceso, implementar este cambio, medirlo y controlar sus resultados para llevar a cabo las acciones correctoras (Pons, 2014).

Teniendo estas herramientas como base, Womack *et al.* (1996) definieron el pensamiento *Lean* con cinco principios básicos:

1. Valor de cada proyecto desde la perspectiva del cliente.
2. Identificar el flujo o cadena de valor (*value stream*).
3. Permitir que el flujo de valor fluya sin interrupciones.
4. Sistema *Pull*.
5. La búsqueda permanentemente de la perfección.

Para el primero, el valor es el principal punto de partida del pensamiento *Lean*, al definirse como la importancia que un cliente o consumidor, le atribuye a un servicio o producto para cumplir una finalidad a un precio especificado. Esto se logra, con una especial dedicación al momento del detallado de las especificaciones impuestas por el cliente, para lograr un correcto entendimiento del diseño de un producto y desarrollar el proceso de mayor eficiencia para fabricarlo. La cadena de valor, comprende todas las actividades necesarias para la generación final de un producto o servicio, hasta la finalización y entrega para el cliente (Fig. 2.10). El flujo de valor de una empresa, normalmente abarca desde que entra el pedido de un cliente hasta que se efectúa su cobro, comenzando desde que se realiza el pedido de la materia prima, hasta que se obtiene un producto final, preparado para adquirirse directamente por un cliente. Las empresas *Lean*, tienen como objetivo principal focalizar en los flujos de valor, debido a que en estos es donde se generan las

ganancias, donde comúnmente resulta más fácil identificar los desperdicios y generar acciones para eliminarlos (Pons, 2014).

Dentro de esta, *Lean* permite la identificación de los procesos específicos que aportan un valor añadido hacia un producto final, en contraste con las actividades que generen retrasos y desperdicios, lo que permite optimizar estos procesos detalladamente para la disminución de desperdicios en conjunto con los factores externos que pudieran retrasar el producto final. El tercer principio, se basa en la continuidad de los procesos evitando las interrupciones y desperdicios identificados anteriormente. Este, desarrolla la identificación y eliminación de la mayor cantidad de actividades que no generen un valor en la mejora de la productividad ni el aumento de la calidad al cliente (Womack *et al.*, 1996).



Figura 2.10. Cadena o flujo de valor según filosofía *Lean* (Pons, 2014).

El sistema *Pull*, es un componente fundamental para la herramienta JIT, debido a que se presenta como un esfuerzo por eliminar el exceso de inventario y la sobreproducción. Este sistema, aplica un control de la producción contemplando las etapas primarias en conjunto con las

secundarias en orden ascendente hacía el producto o servicio final, para el trabajo en constante comunicación entre ambas.

Donde las actividades primarias, tanto las que están en las mismas instalaciones como en instalaciones separadas, informan de manera conjunta las necesidades que requieren para producción a las actividades secundarias, sobre qué elemento o material necesitan, en qué cantidad, cuándo y dónde lo necesitan (*e.g.* mediante tarjetas *Kanban*). Es decir, que el proceso de las actividades secundarias, no genera avances en producción hasta que el proceso de las actividades primarias lo necesita. Cabe destacar, que, para este sistema el cliente es el que determina la demanda de productos o servicios. Esto, es contrario a los sistemas productivos convencionales que se encuentran basados en la generación a gran escala y máxima velocidad, que van de acuerdo con una estimación de una demanda estadística sin tener en cuenta el ritmo actual de trabajo del siguiente proceso o la demanda real del cliente (Womack *et al.*, 1996).

En la Figura 2.11 se aprecia la comparativa entre un sistema de gestión tradicional contra un sistema completamente enfocado en la filosofía y metodología *Lean*. En esta, se exponen las deficiencias que coexisten en todas las etapas del sistema tradicional, a la hora de no contemplar los desperdicios o tiempos perdidos (*i.e.* tiempos muertos), generando cierta improductividad que no se ha contemplado desde el punto de vista económico. Esto es lo que genera toda una serie de pérdidas “mínimas” para cada una de las etapas, que, al contemplar todo el sistema de producción, se hace notorio todo ese gasto innecesario por una cuestión de gestión en la operación.

Por otro lado, con el enfoque *Lean*, desde el comienzo del proyecto se contemplan todos los actores involucrados, para impulsar las herramientas que se tienen para maximizar la productividad y minimizar tiempos perdidos, actividades, gestiones y transacciones inútiles que

no contribuyen a la producción general, contemplando los intereses generales de todos los actores involucrados y no solamente los intereses puntuales (Pons, 2014).

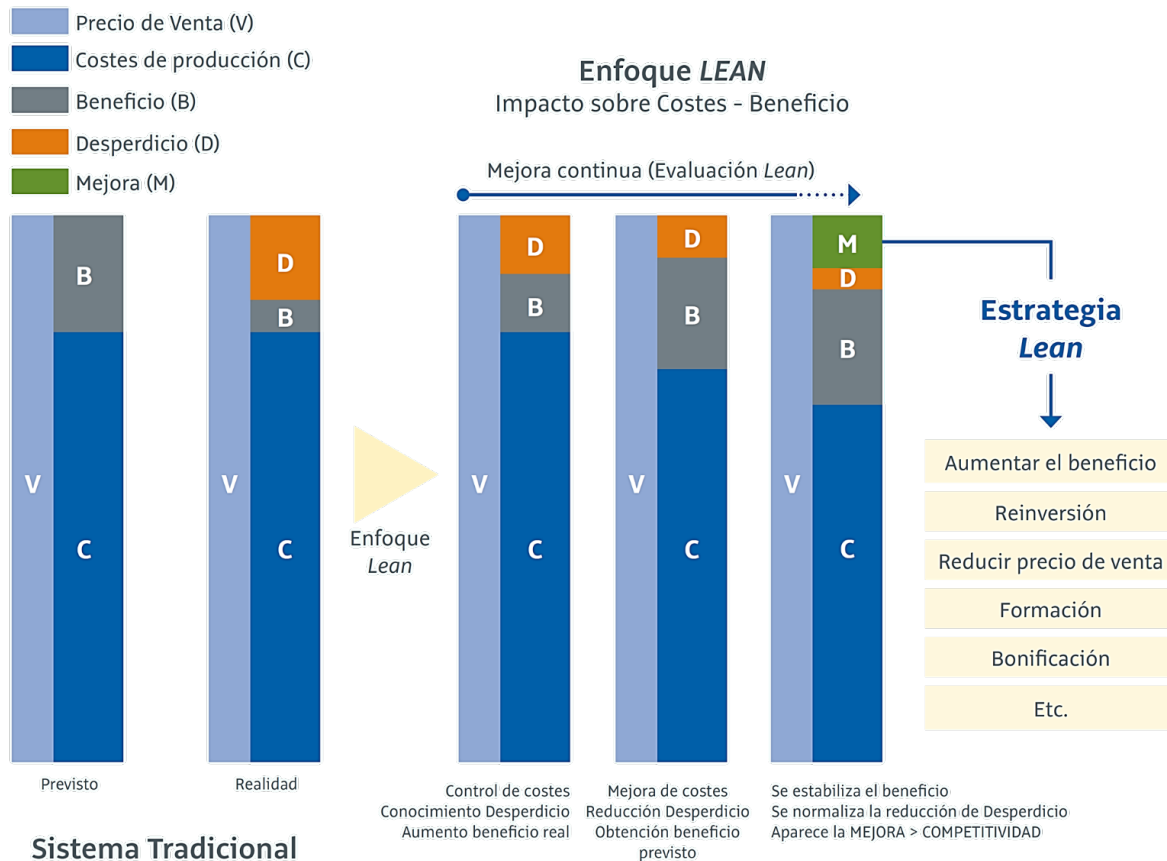


Figura 2.11. Sistema de gestión tradicional vs. metodología *Lean* (Pons, 2014).

También, esta metodología fue adoptada por otras industrias de gran importancia internacional, dentro de las cuales se encuentran organismos gubernamentales, industrias dedicadas a la salud y al cuidado personal, desde los procesos de producción de medicamentos hasta la forma de distribución. Industrias alimenticias, tanto los productores en procesadoras, como la distribución de inventarios en grandes cadenas de alimentos.

2.3.1. Construcción *Lean*

En la gestión de la construcción, se conoce que, para todo tipo de proyectos se debe garantizar el alcance en tiempo y forma de todos los objetivos planteados dentro de la etapa de planeación. Comúnmente, se implementan herramientas, técnicas, habilidades y recursos disponibles para lograr el correcto desarrollo de un proyecto. Desde herramientas tradicionales como itinerarios o agendas de trabajo, diagramas de *Gantt*, de *Pert* y generación de la ruta crítica, hasta las nuevas herramientas abordadas en la [Sección 2.2](#). El cumplimiento de todos los objetivos planteados, se obtiene con una gestión eficaz y eficiente, que en conjunto logran superar las expectativas de este, maximizando recursos, tiempo, dinero, personal, áreas de trabajo, entre otros ([Ansah et al., 2015](#)). En las últimas dos décadas, la industria de la construcción, ha logrado mejoras de rendimientos al aumentar la productividad con la aplicación de la metodología *Lean* ([Sección 2.3](#)) enfocada en la mejora continua de procesos en la construcción, mediante la eliminación de residuos por cada etapa involucrada en una cadena productiva.

[Koskela \(1992\)](#) formuló un modelo basado en la metodología de manufactura *Lean*, donde introduce cambios conceptuales en la gestión de la construcción, con el objetivo de mejorar la productividad enfocando todos los esfuerzos en la estabilidad del flujo de trabajo. En este estudio, se examinaron las bases conceptuales de las filosofías de producción tradicionales con las nuevas, tal como se aplican en la fabricación, para contrastarlas en la industria de la construcción. Con esto, se genera un conjunto inicial de principios de diseño y mejora, para los procesos de flujo que funcionan como guía de implementación, al fomentar la industrialización, la construcción integrada por computadora y la automatización de la construcción, llegando a la llamada Construcción *Lean*.

De acuerdo con Pons (2014) la Construcción *Lean* es:

“una filosofía de trabajo que busca la excelencia de la empresa, por lo tanto, sus principios pueden aplicarse en todas las fases de un proyecto: diseño, ingeniería, precomercialización, marketing y ventas, ejecución, servicio de postventa, atención al cliente, puesta en marcha y mantenimiento del edificio, administración de la empresa, logística y relación con la cadena de suministro” (p.26).

Es decir que, la Construcción *Lean*, abarca la aplicación de los principios y herramientas *Lean* al proceso completo de un proyecto constructivo. Con sustento en la gestión integral de la producción para la finalización de un proyecto desde su diseño hasta su entrega, con nuevas formas de diseñar y construir edificios e infraestructuras, en conjunto con todo el proceso de desarrollo. Extiende los objetivos de un sistema de producción ajustada, maximiza el valor del producto final, minimiza los desperdicios, indica las técnicas específicas y se aplican a un nuevo proceso de entrega y ejecución del proyecto.

Por otro lado, esta metodología, puede verse como la progresión desde la construcción artesanal hasta la construcción en masa y la implementación de productos prefabricados (LCI, 2017). En la Figura 2.12, se muestra la Construcción *Lean* derivada de tres clasificaciones (*i.e.* construcción artesanal, industrializada y en masa), la cual, adquiere los principios fundamentales de cada una de ellas, para incluir la metodología *Lean* optimizando los recursos, costos y tiempos, en los métodos aplicados en la construcción. Esto, genera que con el paso del tiempo los mismos equipos de trabajo que han implementado esta metodología, con la experiencia adquirida generen su propio aprendizaje, generando así, la mejora continua en potenciar la productividad.

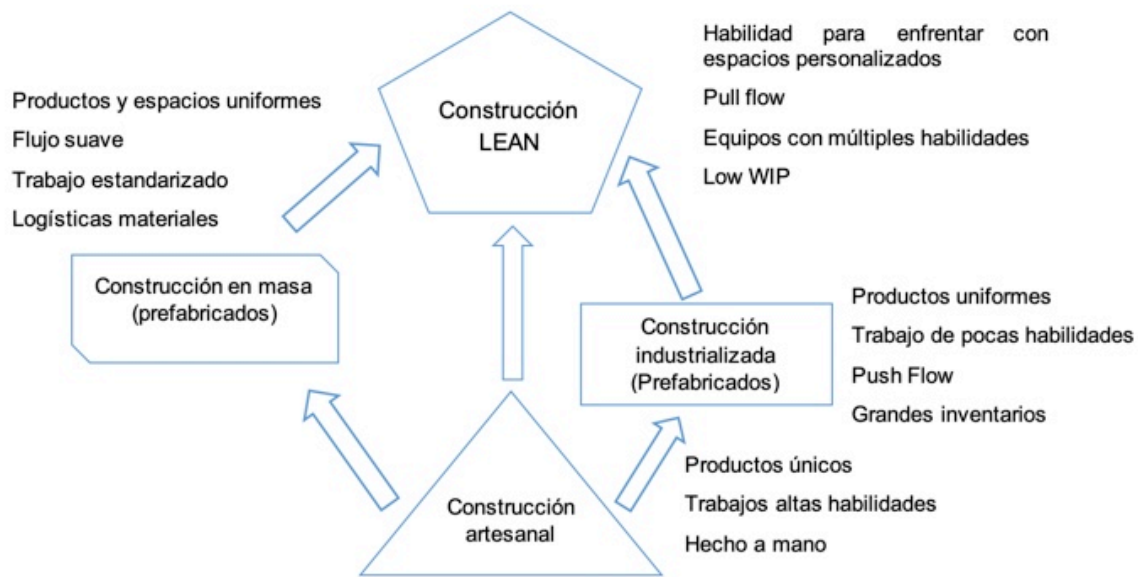


Figura 2.12. Evolución de los sistemas de producción de la construcción (Sacks *et al.*, 2010)

Por un lado, la construcción artesanal, la base de toda la cadena de Construcción *Lean*, la cual consiste en la elaboración de elementos o productos únicos, que solo aquellos trabajadores que presenten altas capacidades y habilidad en producción, son los que agregan valor al producto final. Por lo que la productividad de esta mano de obra especializada, se centra únicamente en estos actores impidiendo la continuidad de las etapas posteriores al termino de estas. Por otro lado, la construcción industrializada y en masa, fomenta el amplio uso de elementos prefabricados para cualquiera de las etapas constructivas, desde elementos de cimentación hasta aquellos que integran las cuestiones estéticas del proyecto. Con esto, se abren las posibilidades para un aumento del alcance de la mano de obra, al separar las tareas complejas en subprocesos que pueden ser realizados sin necesidad de utilizar un grupo especializado. Generando un mayor número de elementos dentro de inventario, para lograr utilizarlos en gran medida, traduciéndose en un incremento considerable de la productividad total.

El conjunto de estos tres tipos de construcción, genera resultados como el trabajo en conjunto de la edificación con los requisitos específicos para la entrega, por lo que el cliente genera una mayor confianza a la hora de dar resultados finales. El análisis desde el nivel de ejecución de todos los procesos involucrados en las etapas de un proyecto, para maximizar completamente la productividad y reducir considerablemente los desperdicios innecesarios. Con especial dedicación en una estructura enfocada a la mejor de la gestión, para incrementar el rendimiento total de un proyecto, antes de considerar la reducción de costos o las posibilidades de realizar procesos con adecuaciones. Una continua comunicación total entre especialistas en diseño, suministro y montaje o ejecución, con la mentalidad de generar la menor cantidad de desperdicios.

La Construcción *Lean* es “especialmente útil en proyectos complejos, inciertos y de alta velocidad. Se cuestiona la creencia de que siempre debe haber una relación entre el tiempo, el coste y la calidad (mayor calidad y velocidad no tiene porqué implicar mayor costo” (Pons, 2014, p.28). El cumplimiento en tiempo y forma de los alcances estipulados desde el comienzo del proyecto, se genera debido a que la edificación junto con su entrega, son diseñadas a la par, contemplando todos los requisitos y especificaciones del cliente. Al tener como objetivo principal el maximizar la productividad y reducir a gran nivel los desperdicios que pudieran generarse. La gestión general se enfoca principalmente en aumentar los rendimientos de cada etapa del proyecto, para poder potenciar el rendimiento total del mismo.

Dentro de los principales beneficios de implementar Construcción *Lean*, se encuentran el cumplimiento del presupuesto original, con una cantidad fija de recursos desde un principio, sin la necesidad de incluir sobre costos generados por una mala gestión de obra. Aumento en el rendimiento, generando así, mayor cantidad de producción. Mejora continua de las condiciones de trabajo, con mayor seguridad, garantizando un entorno seguro minimizando las

posibles pérdidas generadas por no implementar medidas adecuadas. Disminución en el número de demandas y reclamaciones por parte del cliente, reduciendo los tiempos de entrega para cumplir con cierta anticipación a la fecha pactada de entrega (Pons, 2014). La salud de los trabajadores, con la eficiencia de procesos para no utilizar las capacidades completas y reducir los desechos, puesto que pueden minimizarse en el sitio y los productos pueden entregarse en el momento oportuno en lugar de acumularse en la obra (Smith, 2007).

Por otro lado, deben considerarse las complicaciones de implementar esta metodología, traduciéndose a manera de limitantes, desafíos y cuestiones de adaptación. Dentro de estos desafíos se encuentra la falta de conocimiento general sobre la metodología *Lean* y los múltiples beneficios que se obtienen al implementarla. La resistencia al cambio de metodologías tradicionales hacía un nuevo estándar de trabajo, lo que requiere un cambio completo de pensamiento y comportamientos que los trabajadores no siempre adoptan fácilmente. Falta de normatividad para el desarrollo de esta metodología. Comunicación limitada y falta de colaboración entre contratistas, constructores y el cliente, entre otros (Pons, 2014).

2.4. Sustentabilidad en sinergia de Construcción *Lean*-BIM

En las Secciones 2.2-2.3, se desarrolló el conjunto de actores principales para este TOG, con la finalidad de trasladarlos a un enfoque dentro de la sustentabilidad en la construcción. La sustentabilidad (Fig. 2.13), es aquella capacidad de mantener la diversidad y el equilibrio de los ecosistemas, con la posibilidad de lograr el desarrollo social y económico sin dañar la viabilidad ecológica, es decir, estableciendo una relación entre el grupo social y el ambiente que permita la

coexistencia de ambos. Esta, ha dejado de ser exclusivamente para terminologías ambientales, con la transformación de la ideología para emplearse en la gestión de investigaciones y publicaciones en la actualidad; en donde sus principios radican desde su aparición en las primeras conferencias implementadas por las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, conocidas como Cumbres de la Tierra (Sachs,1981).



Figura 2.13. Enfoques principales de la sustentabilidad.

La Construcción *Lean* y los modelos de información BIM, son iniciativas un tanto diferentes, pero ambos tienen impactos profundos en la industria de la construcción. Un análisis riguroso de la infinidad de interacciones específicas entre ellos, indica que existe una sinergia que, si se entiende adecuadamente en términos teóricos, puede explotarse para mejorar los procesos de construcción más allá del grado en que podría mejorarse mediante la aplicación de cualquiera de estos paradigmas de forma independiente (Sacks *et al.*, 2010).

La filosofía *Lean*, se centra en eliminar el desperdicio y maximizar la productividad. Sin embargo, aunque hay muchos otros métodos de Construcción *Lean*, poco ha sido el enfoque para

la sustentabilidad, ya que es un tema relativamente nuevo. “La idea de emplear los principios de *Lean Construction* en la Construcción Sustentable surge de la problemática de que no existen herramientas de gestión desarrolladas para la implementación de proyectos sustentables, en un escenario donde sólo se han establecido criterios generales y el cumplimiento de requerimientos finales” (Martínez *et al.*, 2009, p.7).

Los paradigmas y proyecciones de los daños ambientales estimados para años futuros, han generado la inquietud constante de múltiples disciplinas para lograr contribuir de manera significativa en la modificación de conductas que llevan hacia estos escenarios. Contemplando desde la forma de producir energía hasta el direccionamiento de factores implicados en la cuestión económica, al incrementar la eficiencia y el desempeño de edificaciones en una forma de costos con beneficios ambientales, al optar por implementar estrategias sustentables.

El diseño sustentable o construcción ecológica, presenta un enfoque holístico para todas las disciplinas de diseño y construcción, mientras que con la adopción de la sinergia *Lean-BIM*, se implementa toda su capacidad para facilitar el diseño integrado. Al incluir modelos de uso de energía y estudios de iluminación natural, las herramientas de BIM, proporcionan mejor información sobre como los cambios de diseño afectan el rendimiento del edificio, comparadas con cualquier herramienta de diseño tradicional (McGraw-Hill Construction, 2012).

La construcción ecológica es cada vez más exigida por un público consciente de las amenazas del cambio climático. *Lean-BIM* ayuda a los diseñadores de edificios a lograr una construcción sustentable desde el punto de vista ambiental, al proporcionar herramientas para el análisis de las necesidades energéticas, para acceder y especificar productos y materiales de construcción con bajo impacto ambiental (Eastman *et al.*, 2008).

En las últimas décadas, se han desarrollado diversas metodologías que generan contribuciones considerables a la sustentabilidad en la construcción. Dentro de estas, se encuentran las clasificaciones impuestas en códigos generados por organismos especialmente dedicados en lograr la mayor contribución a la sustentabilidad, sin afectar el comportamiento de respuesta, utilidad y eficiencia de los edificios (Tabla 2.3).

En contraste con lo anterior, en 1993 el *Green Building Council*, implementó la famosa clasificación *Leadership in Energy & Environmental Design* (LEED), que hoy en día es el sistema de clasificación más reconocido mundialmente. Compuesto por más de 76 capítulos, 12,800 organizaciones y superando los 200 mil expertos certificados en LEED para el pasado año 2012 (Hardin and McCool, 2015). Las posibles clasificaciones que se adquieren al seguir los requisitos de acuerdo con el código correspondiente del proyecto, generan cierto nivel de dificultad al momento de tratar de implementarlas dentro de una visión tradicional (*i.e.* 2D). Es por ello, que, al utilizar herramientas y la metodología *Lean-BIM*, es posible aplicar las condiciones necesarias para realizar modificaciones de acuerdo con la clasificación más adecuada al proyecto, sin alterar la integridad de este (*i.e.* BIM en 6D).

Existen herramientas BIM que se enfocan especialmente a la sustentabilidad, con la finalidad de tener una percepción inmediata en como las decisiones de diseño impactan en el desempeño del proyecto, implementando códigos (Tabla 2.3) para obtener alguna de las clasificaciones de estos. Estas, se dedican al estudio de diferentes aspectos, como el análisis del confort térmico interior, la simulación de costos de energía como los asociados con la iluminación, la simulación de fuentes de energía renovable, determinación de la huella de carbono, entre otros.

Tabla 2.3. Códigos especializados en sustentabilidad y sus requisitos generales (Hardin and McCool, 2015).

Code	Requirements
IgCC—International Green Construction Code	Site Selection, Water Use, Energy, Indoor Quality, Materials and Resources, Commissioning
Title 24—California Energy Commission	Building Envelope, HVAC, Indoor/Outdoor/Sign Lighting, Power, Solar Ready, Covered Process (Air Quality), Performance Approach, Commissioning
ASHRAE 189.1—Standard for High Performance Green Building	Site Selection, Water Use, Energy, Indoor Quality, Materials and Resources, Commissioning
Part L (L1A)—Conservation of Fuel and Power in New Dwellings	HVAC, Lighting, Building Fabric
ASHRAE 90.1—Energy Standard for Buildings	Exterior Skin, HVAC, Service Water Heating, Power, Lighting, and Other
ASHRAE 62.1—Indoor Air Quality (IAQ) Regulations	Air Flow and Indoor/Outdoor Air Ratios
ASHRAE 55—Thermal Conditions for Human Occupancy	Temperature and Humidity of Indoor Spaces

Tienen como objetivo principal, la reducción del impacto ambiental del sector de la construcción, y en muchos casos, esto se ha convertido en un requisito previo de los proyectos de por parte del cliente. En la [Tabla 2.4](#) se aprecian las sinergias principales de la implementación de metodologías en BIM-Construcción *Lean*.

Con la generación de modelos que se encuentren enfocados en el cumplimiento de los requisitos de acuerdo con algún código, con la finalidad de potenciar la sustentabilidad, es posible proporcionar información detallada a los fabricantes de productos, permitiendo y potenciando el uso de la prefabricación. Esto, genera la posibilidad de eliminar desperdicios y hace que el proceso de construcción sea más rápido y ecológico.

Tabla 2.4. Sinergias principales en BIM-Construcción *Lean* en la sustentabilidad (De Carvalho *et al.*, 2017).

Dimensiones de la Sustentabilidad	Sinergia principal
Ambiental	Reducción de residuos; reducción del consumo de energía; reducción en el uso de agua; reducción en las emisiones de carbono; reducción ambiental de impactos; mejora en innovaciones sustentables; mejora en calidad ambiental; contribuye a una visión integral en temas de sustentabilidad; mayor eficiencia energética; reciclaje de materiales; mayor credibilidad ecológica.
Económico	Reducción de costos y tiempos de espera; incremento en la productividad; incremento en la constructibilidad; evita el "fracaso" de diseños para instalaciones; reduce riesgos de retrabajo y/o un desempeño deficiente de las instalaciones; reduce costos relacionados con el inventario; reduce costos iniciales; incrementa ventajas competitivas de sustentabilidad; mejora la imagen corporativa; mejora el flujo de los procesos; mayor cumplimiento de las expectativas de los clientes; optimización del uso de recursos; optimización de procesos; mejora continua; mayor desempeño del edificio; reduce procesos de variabilidad; rompiendo barreras; producto mejorado; mejora en el proceso de toma de decisiones; mayor creación de valor; mayor flexibilidad y adaptabilidad; facilita el cumplimiento de los requisitos de mantenimiento; mayor credibilidad de las instalaciones; mayor calidad; transparencia.
Social	Mejora en la salud y seguridad del ambiente laboral; aumento de la moral y el compromiso de los empleados; ambiente laboral limpio y organizado; flujo de trabajo mejorado; minimización de conflictos; mejora en el desempeño social; desarrollo local; relación mejorada con la comunidad; mejora en las relaciones de las partes interesadas; bienestar.

Hardin and McCool (2015) mencionan que al usar BIM para diseñar y planificar proyectos con mayor predicción en los resultados, los contratistas se sienten más confiados en utilizar técnicas como la prefabricación, preensamblado y modulación. Es decir, que, con el alcance que se obtiene al tener edificios modelados virtualmente, en conjunto con todas las etapas involucradas en un proyecto, permite apreciar todos los detalles necesarios para la generación de una construcción modular. En la siguiente sección, se abordará el alcance y las posibilidades que se generan con estas consideraciones aplicadas en la elaboración de elementos prefabricados.

2.4.1. Construcción con elementos prefabricados

En las Secciones 2.1-2.3, se abordaron un conjunto de conocimientos, metodologías y tecnologías como posibilidad de cambiar el enfoque general de la industria de la construcción. Con altas posibilidades, de apreciar un proyecto completo desde su etapa de diseño y planeación, hasta su operación, mantenimiento y si es el caso, su ciclo de vida contemplando su demolición y manejo de materiales producto de esta. Estas posibilidades, logran tener un comprendimiento total del proyecto, capaz de enfocarse en las cuestiones de automatización, al observar la cantidad de elementos o procedimientos que se repetirán múltiples veces a lo largo de un proyecto. Por lo cual, se presenta la prefabricación, por la posibilidad de trasladar ciertas tareas a un lugar con mayor capacidad de operación, para no interferir con el resto de los procesos (Monjo, 2005).

Estas consideraciones, han logrado influenciar de manera significativa, para que una cantidad considerable de países, adopten en cierto nivel, la construcción prefabricada. Dentro de ellos, Suecia, donde la construcción modular, logró abarcar un amplio porcentaje de adopción, con un 80% de las viviendas construidas, al compararse con las técnicas convencionales. En Japón, se generó una apropiación positiva a los procesos de modulación en vivienda, a tal grado de que el 20% de las viviendas edificadas recientemente, corresponden a metodologías constructivas de modulación con elementos prefabricados. Polonia, apuesta por la combinación del acero y la madera en fabricación modular para la construcción del sector hotelero, aumentando su productividad, al poder implementarse en cualquier tipo de construcción, sin necesidad de realizar piezas o consideraciones especiales gracias a la modulación. Para Singapur y Hong Kong, la innovación tecnológica, se considera uno de los principales factores para el desarrollo en general, por lo que se encuentra dentro de las labores de mayor importancia en manejo de presupuestos de gobierno (DDA, 2020).

Sin embargo, estas posibilidades se han visto rezagadas en lo que respecta de México, debido a la adopción obligatoria, por así decirlo, de las prácticas en construcción tradicional. A la par de este factor, se presenta la gran abundancia de mano de obra con experiencia considerable dentro de dichas prácticas. También, las cuestiones de

Conforme se incrementa la adopción de nuevas metodologías constructivas, como las expuestas en las **Secciones 2.2-2.3**, aumentan las posibilidades de desarrollar una gran variedad de elementos prefabricados, que conducen hacia una construcción modular. Estas ramas de la construcción, están experimentando una importante expansión de interés y uso a medida que su industria busca mejorar la seguridad, la productividad, la calidad, el costo, los tiempos y la sustentabilidad mientras continúa enfrentando escasez de mano de obra calificada, incertidumbres de costos y otros desafíos.

De acuerdo con **DDA 2020**, para un gran porcentaje de contratistas que se consideraron en un estudio realizado en EUA en el año 2019, sobre las capacidades que se pudieron apreciar al momento de implementar las metodologías BIM, los beneficios por utilizarlas fueron satisfactoriamente considerables. Se enfocaron en el estudio de siete factores clave en el rendimiento de proyectos constructivos (**Fig. 2.14**). Dentro de los cuales, se tienen incrementos de productividad y la calidad, impactos positivos en el presupuesto y el desempeño de la planeación, mejora hacia un entorno más sustentable, con la generación de menos desechos el aumento en la seguridad con elementos de fácil ensamble y módulos producidos fuera del sitio de trabajo. Los resultados revelan que al menos las tres cuartas partes de los usuarios actuales, están recibiendo un nivel significativo (*i.e.* medio, alto o muy alto) de estos siete factores que se traducen directamente como beneficios.

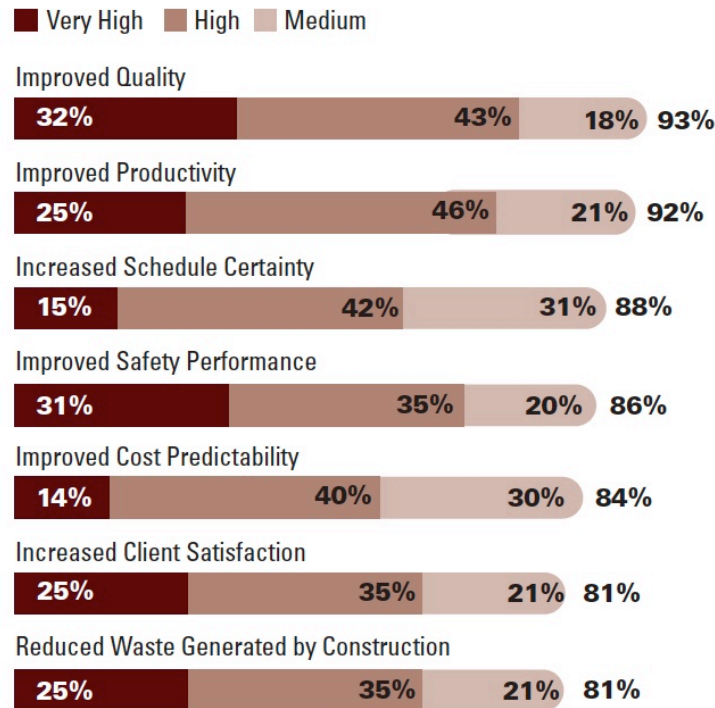


Figura 2.14. Impactos en el uso de prefabricados para contratistas de EUA: Contribución de siete factores clave en rendimientos (DDA, 2020).

Dentro del mismo estudio, se determinaron cuáles son los impulsores para la adopción de BIM en elementos prefabricados, donde a los encuestados, se les indicó seleccionar tres razones por la cual lo utilizan estos elementos, siendo la mejora en la coordinación de las distintas disciplinas, la que obtuvo la mayor puntuación. También, se indicó que en los últimos tres años los factores que más han influenciado para el uso de la prefabricación son la mejora en la productividad, mantenerse competitivo, mejora en el desempeño de costos, condiciones de trabajo más seguras y por demanda del propietario (Fig. 2.15). El incremento en el rendimiento de costos es el segundo lugar más alto demostrando que los arquitectos e ingenieros entienden que la prefabricación puede tener una influencia positiva en el control de costos y debería conducir a un mayor desarrollo de soluciones de diseño que lo permitan conscientemente.

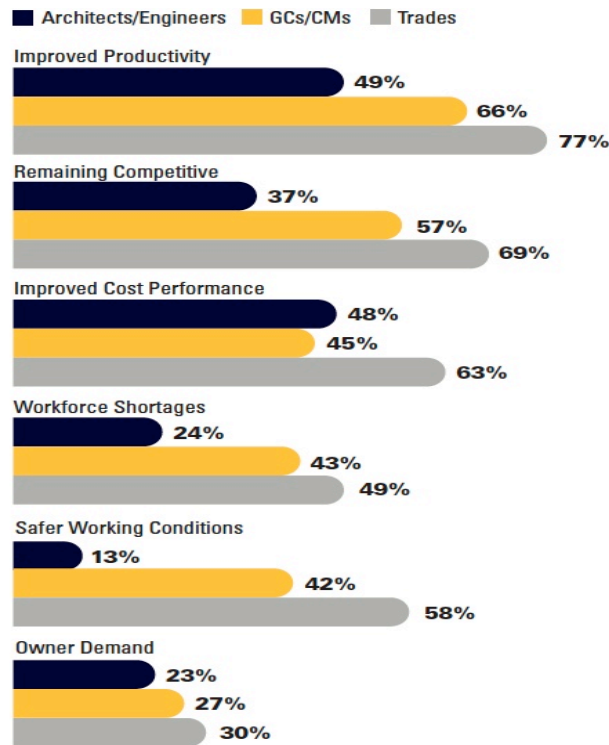
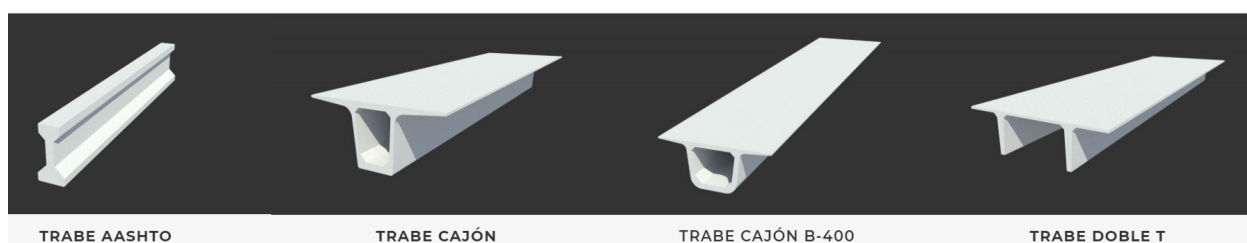


Figura 2.15. Factores de influencia en uso de prefabricados para ingenieros, arquitectos y contratistas de EUA (DDA, 2020).

Por otro lado, en México, se presenta cierta adopción a los elementos prefabricados, especialmente diseñados para la edificación modular de ciertos sistemas constructivos. Desde bloques de concreto y block hueco para elementos tipo muro de carga, hasta sistemas de cubierta compuestos por vigueta y bovedilla (Fig. 2.16a), para construcción de casa habitación en serie, cuando todas las viviendas que conforman un bloque o manzana, presentan las mismas características de diseño y dimensiones. También, se tienen elementos de mayor complejidad constructiva, como trabes de dimensiones especiales, trabes de tipo cajón y trabes tipo doble T (Fig. 2.16b) que suelen utilizarse en edificación de grandes complejos habitacionales, hospitales y estacionamientos.



a)



b)

Figura 2.16. Principales elementos prefabricados utilizados en México: a) elementos de pequeña a mediana escala y b) elementos estructurales a gran escala (López, 2018).

Sin embargo, en el país, solamente una cierta parte de las construcciones son edificadas con el uso de elementos prefabricados. Como se abordó en las Secciones 2.4-2.4.1, es de suma importancia fomentar el aumento en la implementación de este tipo de sistemas, debido a que generan menores desperdicios dentro de la construcción, menores tiempos de espera y posibilidad de reducir los costos por la generación de un área específica al armado de elementos estructurales dentro del área de la construcción. Además, el aumento en el uso de este tipo de elementos, abriría grandes posibilidades para que productores pequeños desarrollaran sus prefabricados, generando empleos y los balances de la economía regional.

2.5. Casos análogos

La Construcción *Lean* y la utilización de BIM son metodologías relativamente nuevas, por lo que su estudio y aplicación ha sido muy escaso. Sin embargo, en las últimas décadas se han realizado investigaciones para explorar los múltiples beneficios que se adquieren al optar por las metodologías descritas en la Secciones 2.2-2.4. Dentro de las principales investigaciones se encuentran:

Ballard (2000) introdujo el modelo en la mejora para un programa de obra más confiable llamado “Last Planner System (LPS)”, actualmente utilizado en los proyectos de Construcción *Lean*. Este programa, propone la comunicación constante de los actores involucrados, para obtener la mayor productividad posible en cuanto a las etapas de planeación. Con la gestión compartida por contratistas, constructores y la administración general de un proyecto, trabajando en conjunto con metodologías *Lean*, para maximizar los alcances al disminuir los tiempos perdidos y malas decisiones por cuestiones de diseño preliminar.

CIT and LCI (2004) indican que hasta el 57% del tiempo, el esfuerzo y el material de la inversión en proyectos de construcción no añade valor al producto final, mientras que en comparación en la industria de la fabricación la cifra es solo del 26%.

Diekmann *et al.*, (2004) desarrolló un modelo para evaluar cuales son los principios *Lean* aplicados a la industria manufacturera, más relevantes para el uso en los procesos de construcción.

Green and May (2005) dedicaron su investigación en la evaluación del modelo existente de Construcción *Lean*, desde el punto de vista de los creadores de las políticas públicas, estableciendo en su modelo, que tanto en la manufactura *Lean* como en la Construcción *Lean*, tienen en común que sus raíces están en los elementos humanos y técnicos.

Salem *et al.* (2006) desarrollaron un modelo para evaluar las herramientas *Six-Lean*, utilizada para incrementar la productividad en Construcción *Lean*, con el estudio de la variabilidad del flujo, los procesos de variabilidad, la transparencia y la mejora continua.

Johansen and Walter (2007) investigaron la aplicación, el entendimiento y las técnicas de los conceptos de *Lean*. Esto implementado a ocho áreas dentro de la organización, incluyendo el diseño, adquisiciones, planeación/control, suministros, instalación, colaboración, administración y comportamiento.

The Mortenson Company, es una compañía estadounidense que desarrolla una amplia cantidad de proyectos utilizando metodologías BIM, en conjunto desarrollo con prácticas y herramientas *Lean* por medio de planes de trabajo integrados. Para la construcción del *Showare Center*, un proyecto de 55 millones de dólares, en esta compañía utilizaron una serie de partidas de construcción a manera de distribución de una sola etapa del proyecto, en múltiples tareas repartidas para los trabajadores. Con el desarrollo de expedientes de dibujos tradicionales con especificaciones eléctricas, arquitectónicas, de seguridad y la generación de instrucciones detalladas para cada trabajador. Este conjunto de instrucciones, logró disminuir la incertidumbre de todo el conjunto de actividades por etapa, por lo cual, los tiempos requeridos para la resolución de dudas en los detalles constructivos fueron eliminados. Esto generó una reducción del 38% de los tiempos contemplados para resolución de detallado comparado con proyectos similares. Además, esta implementación, generó un ahorro al propietario de más de 1.7 millones de dólares en costos proyectados en la edificación tradicional (McGraw-Hill Construction, 2010).

También, de acuerdo con McGraw-Hill Construction (2010), para la edificación de la Escuela de Arte Cinematográfico de la Universidad del Sur de California en Los Ángeles, se implementaron metodologías y herramientas BIM en conjunto con metodologías *Lean* para

construcción modular con elementos prefabricados. Debido a que, desde las etapas iniciales del proyecto, se observaron limitantes tanto en presupuesto como en tiempos, la mejor manera de adaptarse a estas circunstancias, fue la adopción de prefabricados. Con el continuo desarrollo de modelos 3D altamente detallados con la incorporación de las interacciones descritas en las Secciones 2.2.1 y 2.4, lograron definir una gran cantidad de posibilidades de aplicación de elementos prefabricados. Tales como, trabes, paneles de techo, techos, plomería, armaduras y paneles de yeso. Con la implementación de estos, se logró generar una reducción significativa tanto de desechos generados por la elaboración en campo de estos, como de tiempos considerados en los cronogramas de trabajo.

De acuerdo con Gao and Phen (2014) el conjunto de prácticas que utilizan la metodología *Lean* en la construcción, también son llamados modelos de construcción o marcos. Los marcos o modelos de Construcción *Lean* más relevantes son los representados en la Tabla 2.5. Estos modelos representan estudios en avances específicos por áreas, es decir, se han enfocado en resolver puntos o conflictos recurrentes en los procesos de construcción, con el fin de ir eliminando la brecha en los avances de los procesos productivos en masa. Estos puntos o conflictos se proponen en cada modelo como objetivos, identificando cuáles son los impulsos que han motivado a los investigadores o profesionales a especializarse en cada práctica. Estos modelos representan los avances en las investigaciones de la Construcción *Lean*, tratando con estos, de resolver paso a paso, la problemática con un orden jerárquico (*i.e.* jerarquía que depende del lugar donde se realizaba el estudio).

En la Tabla 2.5 se aprecia que, en un principio, Koskela (1992) inicia con un modelo para construir las bases teóricas para la Construcción *Lean*, partiendo de los resultados generados por el TPS al incluirlos en la construcción para mejorar los alcances en productividad y calidad.

Después, el modelo de Santos (1999) trata de desarrollar enfoques de implementación heurística del modelo de flujo y con esto, aumentar el conocimiento en temas como la reducción de procesos al ciclo del tiempo, reducir la variabilidad, incrementar la transparencia y la mejora continua. También, se aprecia que solamente tres estudios contemplan la gestión de los recursos humanos como una de las tareas a mejorar de la producción tradicional (Diekmann *et al.*, 2004; Paez *et al.*, 2004 y Green and May, 2005).

Tabla 2.5. Comparativo de modelos de Construcción *Lean* (Gao and Phen, 2014).

No.	Autor	Nombre de modelo	Objetivos	Temas cubiertos	Metodología de investigación	Lugar de aplicación
1	Ballard (2000)	Last Planner System (LPS)	Producir un programa mas confiable	•Cuatro niveles de programación: plan maestro, fase de planificación, planificación a futuro y planificación semanal •Matriz confiable: porcentaje de planificación completo •Juntas grupales diarias: remover barreras potenciales	Casos de estudio	E.U. A.
2	Dieckman et al. (2004)	Rueda de Construcción Lean	Supervisar la extensión a la cual una organización se ajusta a los ideales Lean	•Eliminación de desperdicios •Estandarización •Cultura/personas •Enfoque en el cliente •Mejora continua	Cuestionario y casos de estudio	E.U. A.
3	Green and May (2005)	No se menciona	Evaluar el modelo existente de construcción Lean desde el punto de vista de los creadores de políticas públicas	•Modelo 1: Eliminación de desperdicios •Modelo 2: Asociación •Modelo 3: Estructurando el contexto	Entrevistas por toda la empresa	Reino Unido
4	Johansen and Walter (2007)	No se menciona	Investigar y entender la aplicación de conceptos Lean y técnicas	•El modelo conceptual investiga ocho áreas en una organización, incluyendo diseño, aprovisionamiento, planeación/control, compras, instalación, colaboración, administración y comportamiento	Cuestionario	Alemania
5	Koskela (1992, 2000)	Tres visiones de producción de construcción	Construir fundamentos teóricos para construcción Lean	•Modelo de transformación •Modelo de flujo •Modelo de generación de valor	Desarrollo de modelo y caso de estudio	Países nórdicos
6	Paez et al. (2005)	Construcción Lean como diseño socio-técnico	Revelar que tanto la manufactura Lean como la construcción Lean están basados en elementos comunes, humanos y técnicos	•Sistema humano y subsistema técnico	Desarrollo de modelo	No mencionado
7	Salem, Solomon, Genaidy y Minkarah (2006)	Marco de referencia de asesoría Lean	de Evaluar la implementación de cada herramienta Lean dentro del marco de referencia propuesto	<u>Seis herramientas Lean son identificadas en cuatro enfoques, son</u> •Variabilidad de flujo (i.e. Last Planner) •Variabilidad de procesos (i.e. A prueba de fallos para calidad) •Transparencia (i.e. 5'S) •Mejora continua (i.e. Reuniones grupales)	Caso de estudio (1)	E.U. A.
8	Santos (1999)	Aplicación de modelo de flujo en la industria de la construcción	Desarrollar los acercamientos de la implementación heurística del modelo de flujo	- Influenciado por el trabajo de Koskela (1992), el modelo desarrollado por Santos (1999) contiene cuatro principios: •Reducción del proceso "tiempo de ciclo" •Reducción de la variabilidad •Incremento de transparencia •Mejora continua	Casos de estudio	Reino Unido y Brasil

Por otro lado, Ballard (2000) y Johansen and Walter (2007), centraron su investigación en el entendimiento de cada uno de los procesos que completan las etapas de todo el proyecto constructivo, con la finalidad de entender cómo aplicar cada una de las técnicas de Construcción *Lean* y generar un programa con mayores resultados, maximizando la productividad, minimizando el uso innecesario de recursos, traducéndose como un ahorro en volumen de desperdicios. También, Salem *et al.* (2006) estudiaron la implementación completa de seis herramientas *Lean*, para cada una de las etapas de un proyecto constructivo, con la utilización de cuatro enfoques principales, dentro de los cuales se encuentran la variabilidad de flujos y de procesos, la transparencia y la mejora continua de procesos.

La revista “Ingeniería de Construcción”, presentó en una investigación, tres ejemplos utilizando la metodología *Lean* en conjunto con algunas herramientas tecnológicas correspondientes a BIM. Estas edificaciones corresponden a hospitales en el Estado de California, EUA evitando discrepancias en las dimensiones al utilizar el máximo potencial de BIM. Con la organización de equipos con funciones cruzadas revisaban periódicamente los modelos 3D para lograr las mejores soluciones.

Se identificaron aspectos del diseño y se corrigieron previamente usando los modelos BIM completamente integrados. BIM aumentó la precisión de la información de diseño, lo que permitió dedicarlo directamente a la fabricación y pre-ensamblaje; la cantidad de desechos verdes reciclados alcanzó el 100% y la de construcción mixta y escombros un 91%; los equipos de diseño y construcción usaron el mapeo de cadena de valor para describir el flujo de trabajo. Buscaban ahorrar tiempo durante la construcción.

Con esta idea, el equipo redujo no solo el tiempo sino los residuos de construcción y demolición. Un equipo de diseño estructural usó los métodos de diseño *Lean* para desarrollar un edificio antisísmico, logrando una reducción neta en el tonelaje de acero en el rango de las 4000-7000 Ton, ahorrando dinero y tiempo, además de materiales y recursos (Salgin *et al.*, 2016).

En México, se han implementado metodologías BIM-*Lean* en algunos proyectos, como en la construcción de la Torre KOI Sky en Nuevo León (Fig. 2.17c), la cual es un conjunto mixto de 64 niveles, compuesto por 218 departamentos, con certificación LEED Plata (Sección 2.4) y galardonado con el Premio Obras CEMEX 2017. En este, se utilizaron herramientas BIM para el diseño estructural (Fig. 2.17a), de instalaciones, componentes y adecuaciones sustentables (Fig. 2.17b), donde se logró generar una gestión que garantizó la seguridad a sus trabajadores y con la implementación de diversos elementos prefabricados (Ramírez, 2018 y KOI, 2020).

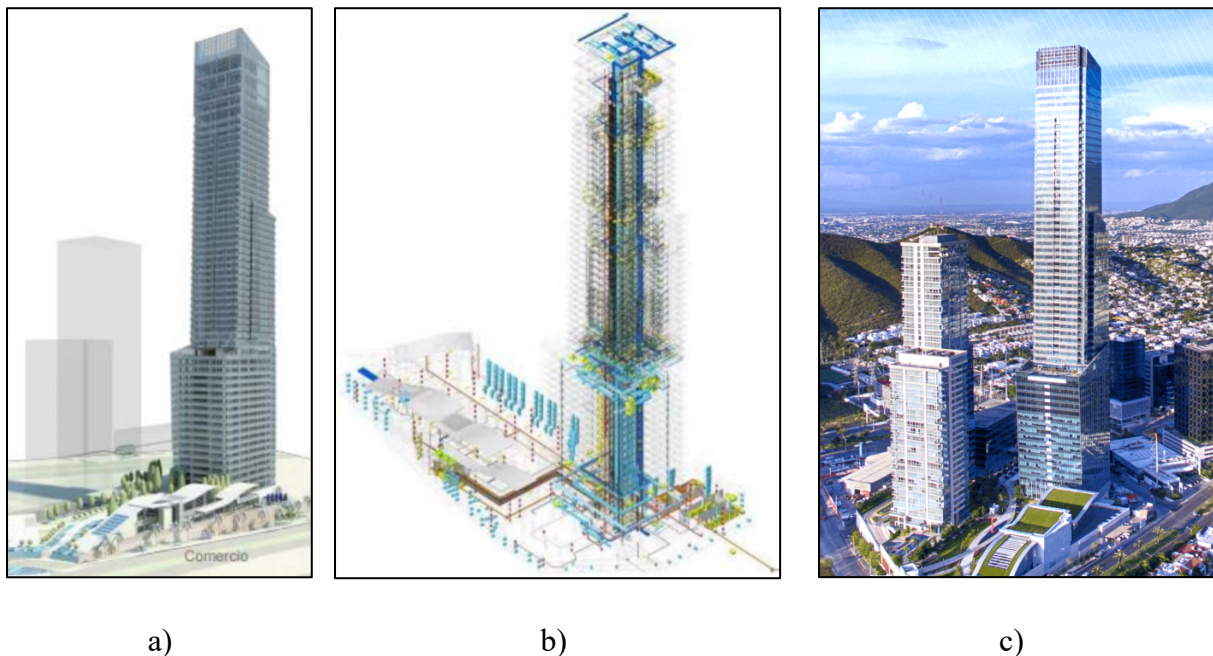


Figura 2.17. Torre KOI Sky, desarrollo vertical de usos múltiples en Nuevo León, México: a) modelado 3D general; b) modelado de instalaciones y c) edificación finalizada (Ramírez, 2018 y KOI, 2020).

También, se tiene la edificación del Centro Internacional de Convenciones Los Cabos, en Baja California Sur, el cual cuenta con 25,922 m² de construcción, con capacidad para más de seis mil personas a lo largo de sus tres salas principales y siete utilizadas para convenciones. Cuenta con un majestuoso recinto enfocado directamente en la sustentabilidad, un muro verde de 2,700 m² como parte de su fachada principal (Fig 2.18). En esta edificación, se utilizaron herramientas para mejorar la gestión de obra y aumentar la productividad en cada etapa constructiva. Con estas herramientas, fue posible la detección temprana de interferencias en las instalaciones e incongruencias en el diseño gneeral, por lo cual, se logró obtener ahorros considerables tanto en tiempos como en costos por evitar modificaciones en la etapa de construcción.



Figura 2.18. Centro Internacional de Convenciones Los Cabos, en Baja California Sur, México
(Ramírez, 2018).

De todos estos estudios se obtuvieron resultados significativos al implementar herramientas BIM-Construcción Lean, aportando directamente en la sustentabilidad. Con una buena gestión de los recursos, minimizando la sobre adquisición de materiales que terminan siendo desperdicios y resultan nocivos para el medio ambiente.

Con una perspectiva completa de todas las posibles interferencias y errores que pudieran presentarse en los procesos constructivos, lo que permite adelantarse a situaciones que pongan en peligro la salud de los trabajadores y la integridad del proyecto. Con beneficios monetarios, con ahorros considerables, al momento de analizar profundamente todas las etapas del proyecto que involucren flujos de efectivo, teniendo especial cuidado en los movimientos que generen gastos innecesarios, necesidad de realizar adecuaciones constructivas, modificaciones estéticas, entre otros.

Contribuyendo de manera responsable con el medio ambiente, al implementar tecnologías que favorecen al ambiente como el confort de los usuarios tanto finales como todos aquellos involucrados en el proceso constructivo. Manejo responsable de los recursos del entorno, respetando la naturaleza y agregando valor al entorno con el desarrollo de espacios verdes y la utilización de energías limpias para la disminución de emisiones innecesarias de CO₂.

Todas estas contribuciones, junto con una gran cantidad de beneficios que se abordaron en las Secciones 2.2.1, 2.3.1 y 2.4-2.4.1, pudieran aplicarse a la construcción que se conoce hoy en día, con la posibilidad de incrementar rendimientos en productividad, materiales y alcances anticipados a las fechas límite de entrega de proyectos. Contribuyendo significativamente al medio ambiente en las principales ramas de la sustentabilidad. Influyendo en el uso y desarrollo de diversos elementos prefabricados para la construcción en serie de edificaciones tanto habitacionales, comerciales y industriales.

Capítulo 3 - Metodología

3.1. Descripción

En el [Capítulo 2](#), se abordó que por medio de una gestión de proyectos de construcción que incluya herramientas de las metodologías *Lean* y BIM, es posible obtener proyectos integrales que beneficien a las tres vertientes del desarrollo sustentable, al reducir consumos de recursos ocasionados por una mala gestión, la generación y gestión inadecuada de residuos y al mejorar las condiciones que puedan propiciar daños a la salud de los trabajadores.

Haciendo uso de las dos metodologías *Lean* y BIM para gestión de proyectos de vivienda vertical en serie, se pueden identificar, planear y diseñar modelos, productos o materiales a la medida de lo requerido, con la finalidad de asegurar que estos sean los más adecuados para el tipo de edificación, adaptables a las condiciones del sitio y que proporcionen la información correcta y necesaria para una adecuada ejecución de todas las fases requeridas para llevar a cabo un proyecto de estas características.

Es por esto, que se realizó un análisis comparativo entre la gestión realizada para la construcción de un caso de edificación de vivienda vertical en serie, con la aplicación de una gestión que haga uso de las metodologías descritas en las [Secciones 2.2-2.4](#). Este se encuentra conformado por cinco etapas ([Fig. 3.1](#)), la primera etapa con el objetivo de elaborar un diagnóstico completo de la situación encontrada en la gestión de obra tradicional. La segunda, para evaluar las herramientas de las dos metodologías (*i.e.* BIM y Construcción-*Lean*) y sus sinergias. La tercera para realizar una selección de las herramientas más adecuadas al proyecto, la cuarta para proponer un nuevo modelo de gestión implementando las sinergias de las metodologías descritas y la quinta para obtener conclusiones.

En la etapa de diagnóstico o marco analítico, se estudió la información técnica del caso de estudio (*i.e.* planos, control de gastos) y el proceso constructivo dentro de la obra, así como su organización y seguridad.

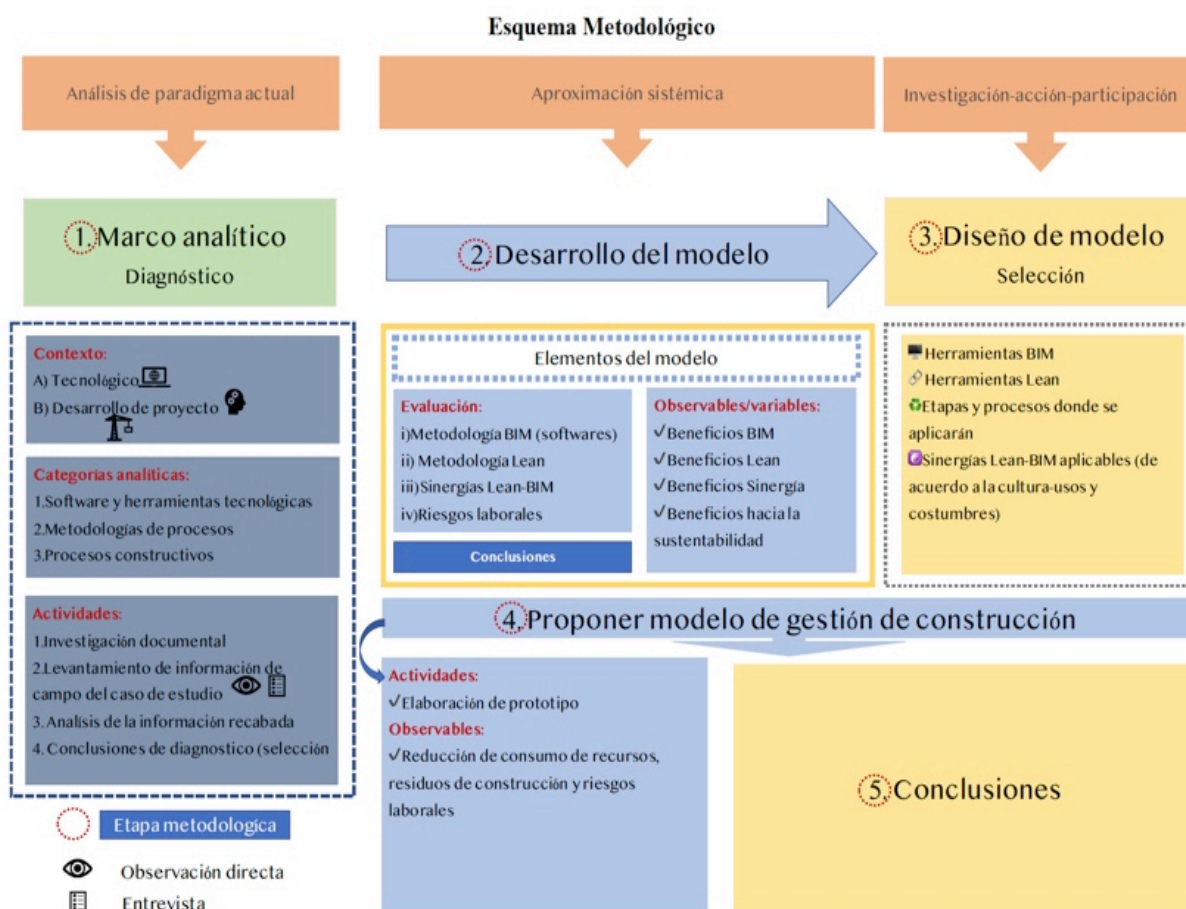


Figura 3.1. Esquema metodológico del TOG.

Para esta etapa, el estudio de la información se realizó por medio de observación directa en el sitio de la construcción y entrevista al responsable del proyecto, con la finalidad de obtener los siguientes datos:

- Cuántas y cuales herramientas tecnológicas se utilizan desde el momento de la planeación hasta la ejecución.

- Constructibilidad y definición de los planos ejecutivos del proyecto.
- Análisis de los procesos constructivos que generan gastos extras
- Inventarios de materiales: el modo de almacenaje y el tipo de manejo que se les da y que puedan generar residuos o pérdidas.
- Determinar cuáles son los riesgos laborales del sitio de construcción.

Esto se realizó en dos visitas; en la primera se revisó la información documental proporcionada (planos, archivos de control financiero y herramientas utilizadas para el proyecto), y en la segunda visita, se verificó lo correspondiente a la ejecución.

Esta verificación fue mediante la observación directa de tipo ordinaria-semiestructurada, con un enfoque orientado hacia la sustentabilidad y utilizando una técnica dentro de la metodología *Lean* llamada *Gemba Walk*, que tiene como objetivo principal conocer el proceso, observar y verificar lo que está ocurriendo. Esta metodología, permite identificar actividades y procesos que pueden afectar a la producción, como la identificación de cuellos de botella, fuentes de desperdicio, deficiencias en los procesos, condiciones inseguras e inapropiadas. Contribuye al entendimiento completo del trabajo de producción, los procesos, las dinámicas y a identificar oportunidades, tanto como para aprovecharlas como potenciarlas (Dalton, 2018).

En esta verificación, solo se está considerando observar las actividades o situaciones que generen consumo adicional de recursos, mayores residuos y daños a la salud. Para lo cual, fue necesario que el gerente de control de obra permitiera el acceso al sitio, así como a la información adicional indicada en la guía.

Como complemento a la observación directa, se realizó una entrevista semiestructurada con preguntas abiertas a la gerencia de control de obra, utilizando la guía y en referencia a los puntos clave observados en la información y las visitas.

Una vez recolectada la información, se realizó un análisis y diagnóstico, cuantitativo y cualitativo para determinar cuáles son los procesos, materiales o sistemas constructivos de mayor impacto en cuanto a la mala utilización de recursos, generación de desperdicios o riesgos de salud.

Para la segunda etapa, que corresponde a la evaluación o desarrollo del modelo, se realizó una investigación documental para entender las implementaciones de las dos metodologías (**Capítulo 2**), sus sinergias y cuáles son las herramientas que se utilizan para el propósito de la investigación de este TOG. Esto con el objetivo de determinar por medio de un enfoque sustentable, la accesibilidad a los recursos de BIM dentro del mercado mexicano, la aplicabilidad de la metodología *Lean* y cuáles son los beneficios ambientales, sociales y económicos de utilizarlas.

En la tercera etapa llamada diseño de modelo de gestión, se seleccionaron las herramientas que, por su función puedan resolver los conflictos identificados y las etapas en las que estas estarán interviniendo. También, las sinergias creadas entre las dos metodologías, con base en los resultados obtenidos en la etapa anterior y las necesidades principales a cubrir.

Para la cuarta etapa se elaboró un modelo de proyecto de gestión con base en las herramientas seleccionadas que resuelvan la problemática identificada, así como su aplicabilidad sea más viable dados los usos y costumbres de esta industria en México. Finalmente, para la quinta etapa se obtuvieron las conclusiones generadas por el desarrollo de las etapas anteriores.

3.2. Relevancia del caso de estudio

Se utilizará el complejo de uso mixto denominado *Zentral* (**Fig. 3.2**) como caso de estudio debido a que cumple con las necesidades para este proyecto de investigación, las cuales consisten en probar el impacto de la sistematización de los modelos constructivos en el medio ambiente.

Además, es elegido por su volumen y geometría de edificación, la cual permitió el estudio de la repetición de sus elementos estructurales, así como de la planificación de sus interiores, ayudando a realizar una propuesta para crear un modelo de gestión de procesos constructivos, que reduzca los desechos de construcción y las cantidades de recursos utilizados, fabricados y transportados a la obra, así como las situaciones de riesgo para la salud de quienes se encuentren en el sitio.



Figura 3.2. Complejo Zentral (ARCHETONIC, 2018).

Asimismo, era posible ir identificando los desperdicios que se generen durante los procesos constructivos y determinar la posibilidad de utilizar materiales o procedimientos alternativos mediante un registro sistemático, que puedan disminuir el impacto al medio ambiente en la comunidad.

Características que ayudaron a seleccionar este caso de estudio y también porque el sistema constructivo con el que fue diseñado es similar al que es utilizado en la mayoría de los edificios

de este tipo de la zona metropolitana de Guadalajara, es decir, se puede considerar como una obra representativa, puesto que los resultados pueden ser aplicables a otros.

Otros motivos de selección se relacionan con sus características y dimensiones, ya que es posible analizar situaciones repetitivas que permitan establecer mecanismos que controlen algunas de las variables y que al modificarlas se pueda obtener un beneficio ambiental.

Aunado a lo anterior, se contaba con la disposición y permiso del Desarrollador para compartir información y acceso a las instalaciones para observar y recabar datos, que, debido al celo profesional en el ramo de la construcción, es complicado obtener este tipo de permisos, por lo que se vuelve una buena oportunidad para realizar una investigación a fondo.

3.3. Descripción de las actividades realizadas

El 13 de marzo del 2018 se realizó la primera visita al sitio de la obra en proceso de construcción del complejo residencial *Zentral*, donde se alojarán los edificios habitacionales que lo conforman.

Por medio de un recorrido guiado por el Arq. Juan Carlos Galarza, por las zonas en ejecución, se observaron los sistemas y procesos constructivos, las actividades y herramientas para llevarlos a cabo, los tipos de materiales, su manejo y almacenamiento, así como la cantidad, ubicación y manejo de los residuos.

Posterior a la observación, se realizó una entrevista en la oficina del gerente del proyecto, el Arq. Carlos García. En esta entrevista se verificó la calidad y cantidad de la información contenida en los planos del proyecto, y se revisaron las herramientas tecnológicas que se están aplicando en el desarrollo de todos los procesos del proyecto.

Se realizaron dos visitas más al sitio para documentar procesos posteriores. Visitas donde se pudieron apreciar la mayoría de las actividades que se involucran en el transcurso de la construcción de este desarrollo inmobiliario, ya que, por las características de este, fueron suficientes para poder presenciar las diferentes etapas constructivas, es decir, al ser modelos repetitivos de un piso a otro y como estos se encontraban en diferentes estados de avance, fue posible observar cada uno.

Esto ayudó a definir los factores más críticos que contribuyen al despilfarro de recursos durante el proceso de construcción, establecer una lista de actividades y tareas consideradas “no óptimas” ya sea por tratarse de errores, omisiones, mala calidad o logística.

Una vez determinadas estas, se entrevistaron a los responsables tanto de planeación y control, como de la ejecución de la obra, con el fin de determinar las causas raíz de cada una, así como los efectos negativos (*i.e.* en impacto ambiental o económico) producidos.

Con esta información se realizó un análisis y diagnóstico para determinar los procesos o actividades que estarían generando gastos extras (*i.e.* recursos materiales, económicos, entre otros), así como las etapas en las que se podrían haber detectado sin consecuencias negativas. Una vez determinadas estas, se seleccionaron las herramientas de las metodologías que ayudaran a resolver la problemática antes mencionada.

Posterior a esto, se elaboró un modelo de gestión de procesos de construcción que tomara en cuenta las necesidades, la cultura y los beneficios que se deseaban obtener y que se pudiera concluir en datos basados en estadísticas de casos estudiados en casos análogos.

En el siguiente capítulo se explicarán las características generales del proyecto, así como las particularidades de las actividades antes mencionadas.

Capítulo 4 - Estudio comparativo

4.1. Descripción del caso

El objeto de estudio es un complejo de uso mixto denominado *Zentral* y se encuentra ubicado en el Anillo Periférico Pte. No. 1066, Santa Margarita, Zapopan, Jalisco, dentro de la AMG (Fig. 4.1 en 20°43'21.6"N 103°25'19.8"W). Es una ubicación estratégica ya que, es la de mayor concentración de población en el estado, la que cuenta con mayores vías de comunicación y vialidades principales como es el caso del periférico Manuel Gómez Morín, así como acceso a servicios públicos y comerciales (INEGI, 2015).



Figura 4.1. Ubicación del caso de estudio (*i.e.* complejo *Zentral*) dentro del AMG (ArcGISApp, 2020).

El complejo se encuentra desplantado sobre un terreno de geometría irregular, con una superficie construida total de 38,598.97 m², divididos en dos torres de edificios para viviendas con una geometría rectangular, colocadas en forma de “L”, así como un tercer edificio para locales comerciales ubicado en sentido paralelo a la calle lateral del periférico (Fig.4.2).

El plan maestro considera tener una tercera torre donde se disponga de más viviendas, un centro comercial y oficinas, es por esto por lo que el proyecto es considerado como mixto. Sin embargo, hasta el termino de las visitas al sitio, aun no se iniciaba esta fase de construcción. Este edificio convergerá al centro del predio, quedando cercana a las otras dos torres antes mencionadas, dando refugio a los vestíbulos de acceso a estas, permitiendo que se beneficien las vistas hacia la ciudad.

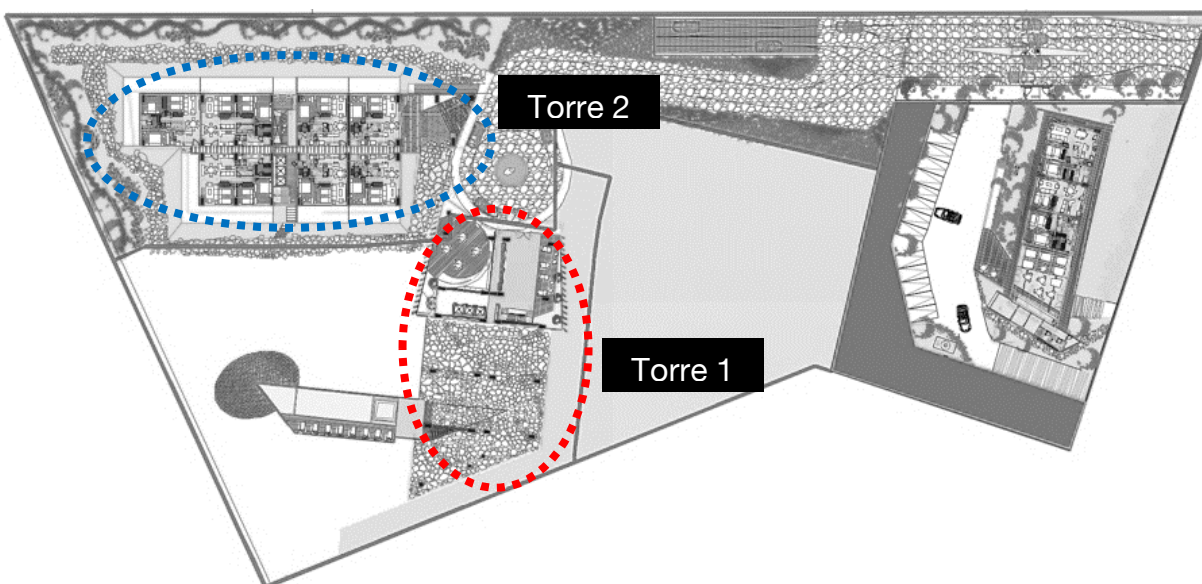


Figura 4.2. Vista general del complejo habitacional *Zentral* (ARCHETONIC, 2018).

Para la Torre 1 se construyeron 17,124.25 m² conformados en 23 niveles con un total de 128 departamentos de tipo vivienda. El primer nivel, consta de siete departamentos: cuatro de tipo “A”, uno tipo “B” y dos de tipo “C”; del nivel dos al nivel 12, son ocho departamentos por nivel:

cuatro de tipo “A”, uno de tipo “B”, dos de tipo “C” y uno de tipo “D”; el nivel 13, cuenta con tres departamentos y amenidades: dos de tipo “A” y uno de tipo “C”; del 14 al 23 son tres departamentos; dos de tipo “A” y uno de tipo “C”.

El primer nivel consta de cinco departamentos de dos recamaras y dos departamentos de tres recamaras, es decir, dos modelos que se repiten (Fig. 4.3).

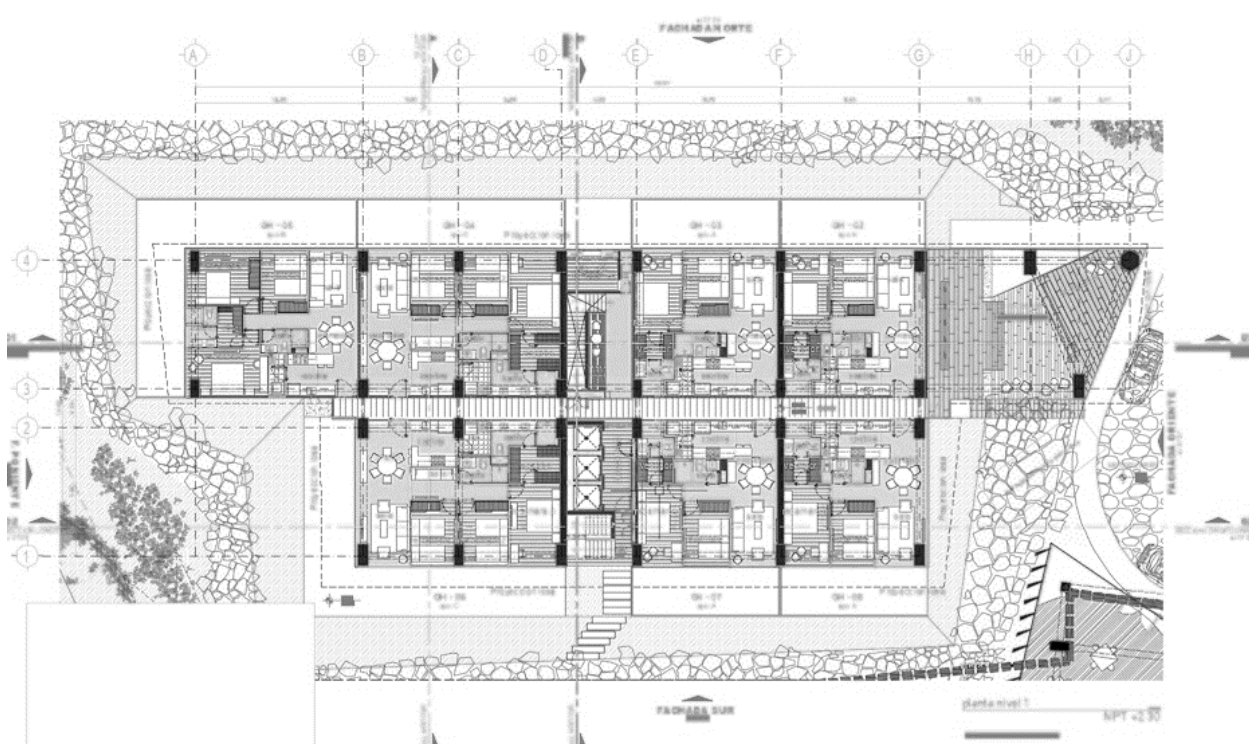


Figura 4.3. Planta arquitectónica del primer nivel de la Torre 1 (ARCHETONIC, 2018).

En los niveles 2-12 la configuración de la planta arquitectónica en estos 11 niveles es similar a la del primer nivel, con la diferencia de la adición de un departamento de tres recamaras en el extremo derecho del edificio (Fig. 4.4). Para los niveles 13 al 23, se repite solo el cuerpo de departamentos del eje 1 al 2 y del B al G, que corresponde a un departamento de tres recamaras y dos de doble recamara (Fig. 4.5).

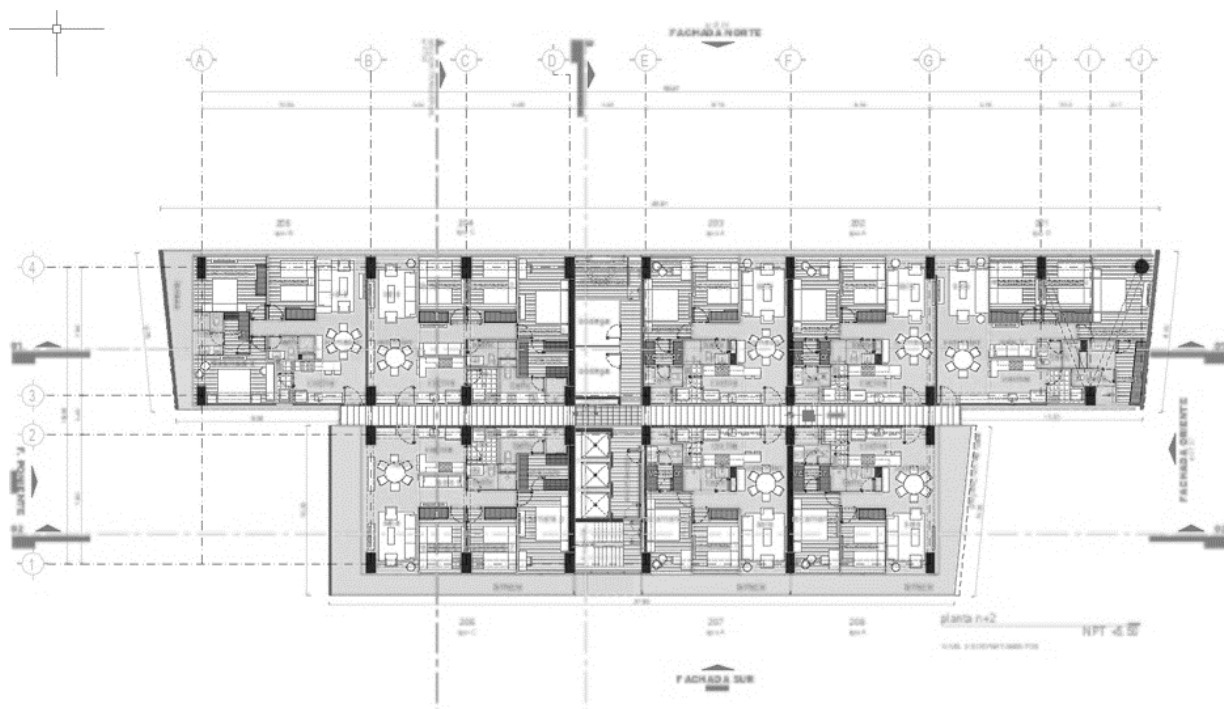


Figura 4.4. Planta arquitectónica de los niveles 2-12 de la Torre 1 (ARCHETONIC, 2018).

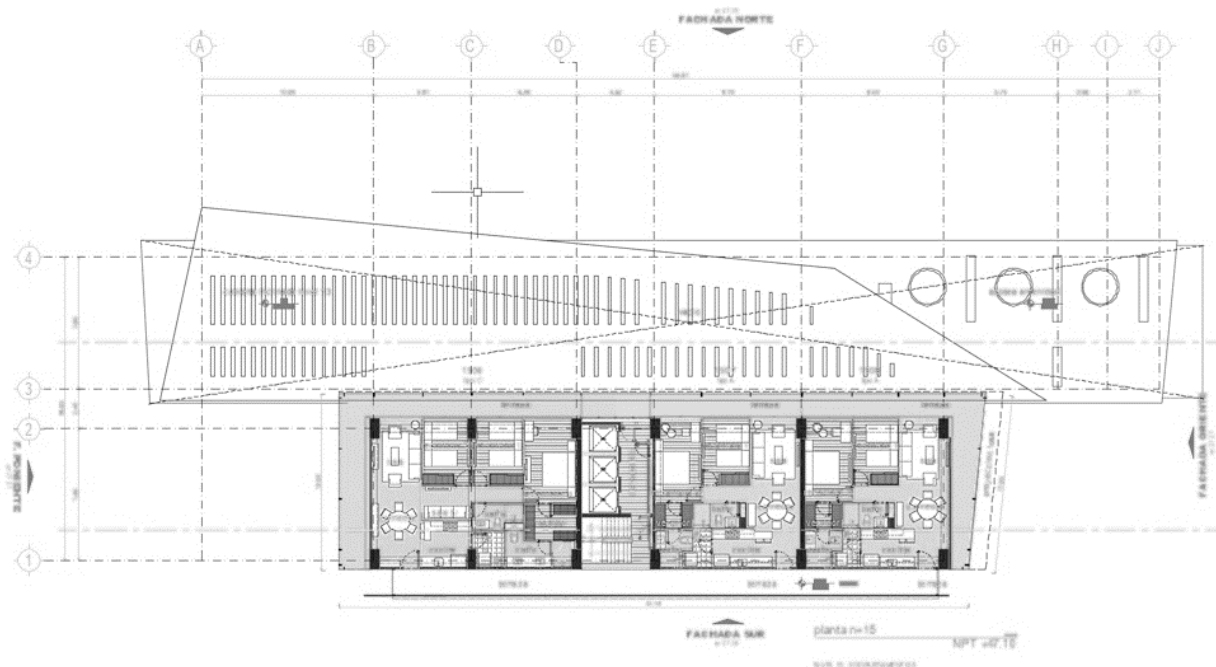


Figura 4.5. Planta arquitectónica de los niveles 13-23 de la Torre 1 (ARCHETONIC, 2018).

La Torre 2 cuenta con 20,900.72 metros cuadrados de construcción con 151 departamentos, distribuidos en 23 niveles. El primer nivel destinado para la recepción o lobby; del nivel dos al número 22 (Fig. 4.6), contará con siete departamentos en cada uno: cuatro tipos “F”, un tipo “G”, un tipo “H” y uno de tipo “I” (Fig. 4.7) y en el nivel 23 solo cuatro departamentos: dos tipos “F”, un tipo “G” y uno de tipo “I” (Fig. 4.8).

Para la Torre 2, al igual que en la Torre 1, la configuración de los interiores es de manera modular, es decir, con modelos de departamentos repetitivos. De los siete departamentos por nivel, solo tres modelos son diferentes.

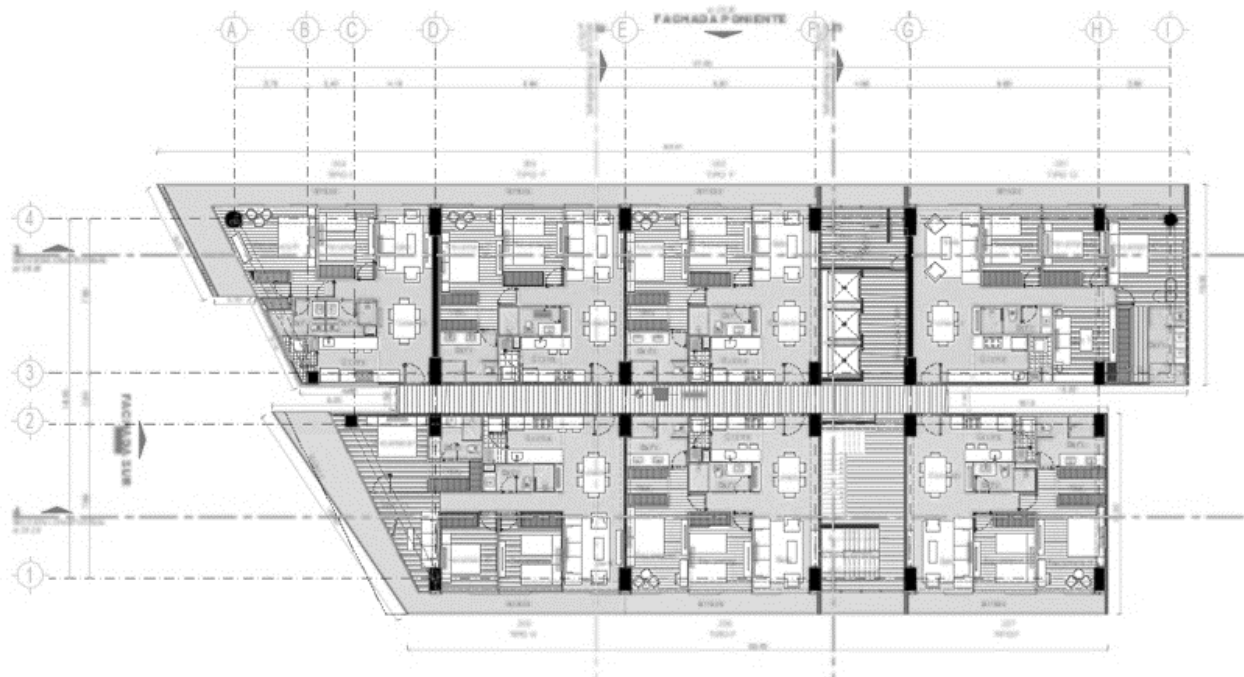


Figura 4.6. Planta arquitectónica de los niveles 2-22 de la Torre 2 (ARCHETONIC, 2018).

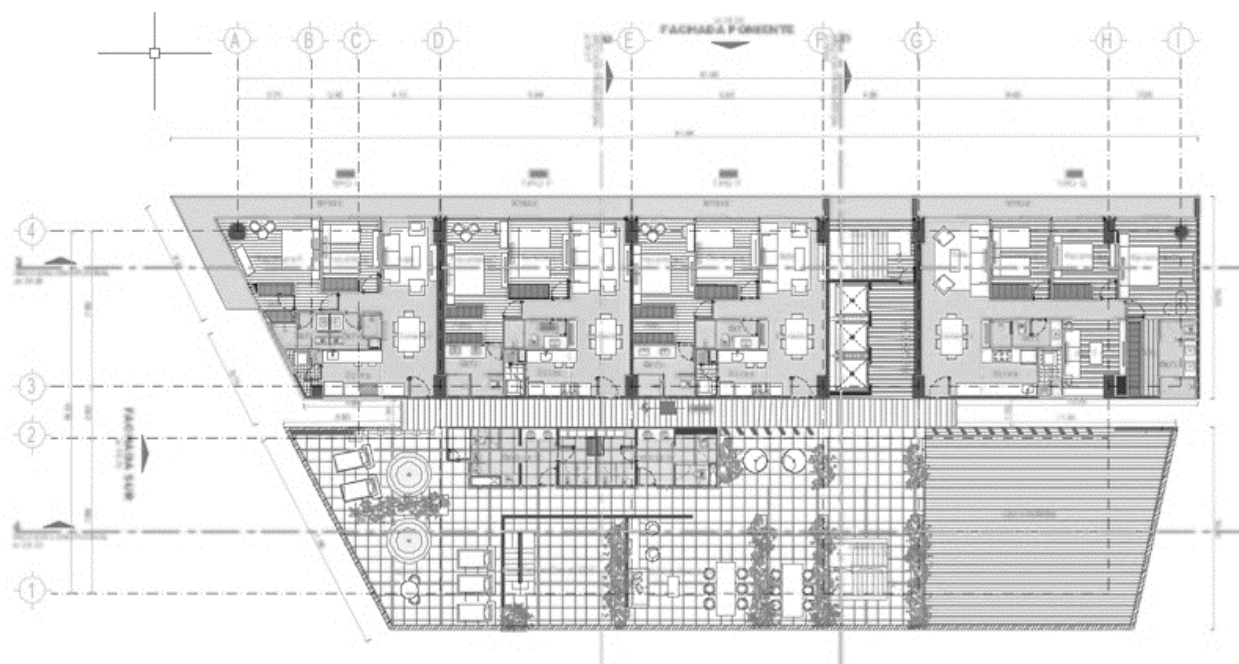


Figura 4.7. Planta arquitectónica del nivel 23 de la Torre 2 (ARCHETONIC, 2018).

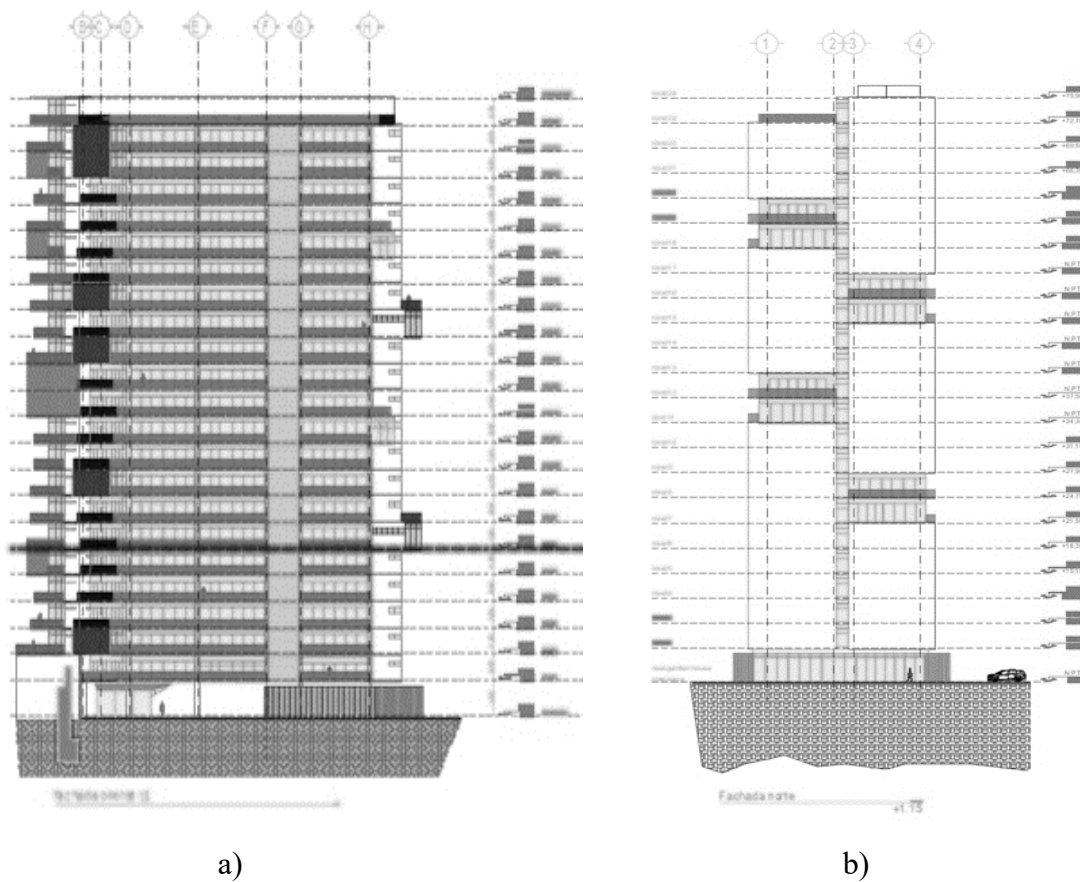


Figura 4.8. Fachadas de las torres del complejo habitacional: a) Torre 1 y b) Torre 2. (ARCHETONIC, 2018).

El sistema constructivo para este complejo se constituye de estructura a base de marcos de concreto (*i.e.* columnas, trabes), vigueta tubular pretensada con bovedillas de poliestireno en losas de entresijos y cubiertas. Las fachadas se componen de muros prefabricados de concreto, muros de block hueco y marcos de aluminio con cristal templado (Figs. 4.8a-b). En los muros interiores, colindantes entre viviendas se utiliza un sistema de block sólido/ hueco y para las divisiones interiores de cada departamento se utilizaron muros conformados por metal galvanizado como estructura, forrados con hojas de cartón de yeso.

Esto, indica que se trata de un complejo de edificios compuesto por diferentes sistemas constructivos, que requieren soluciones particulares para cada uno y en todas las uniones donde interactúan. Así como también, el uso de cimbra para elementos estructurales, trabajos de habilitado de materiales en el sitio, elevación de materiales de los mismo por medio de grúas, bombeo de concreto, descimbrado y movimiento de elementos para cimbra. Lo cual genera una gran cantidad de variables a controlar durante la ejecución de los trabajos.

4.2. Investigación de campo y diagnostico

En esta Sección, se abordará una descripción detallada de las visitas que se realizaron al sitio de construcción del caso de estudio durante la fase de la investigación de campo. Se procederá a hacer un diagnóstico de las observaciones realizadas a la obra, así como de las respuestas a la entrevista a hechas al gerente de control de obra y la información proporcionada por el mismo. La descripción y diagnostico se realizó solo para las fases de diseño y de ejecución de obra, debido a que en estas fases se obtuvo mayor cantidad de información.

De acuerdo con la información proporcionada en la entrevista realizada, el desarrollo del proyecto se realizó bajo el esquema presentado en la **Figura 4.9**, donde el Desarrollador del proyecto, contrató a una firma de arquitectos para el diseño arquitectónico, quienes utilizaron software de modelado virtual comercial (*Revit*®), mientras que por separado contrataron el diseño y cálculo de las distintas especialidades, como el diseño de la estructura y las instalaciones, que, en este caso, utilizaron un software de modelado 2D (*AutoCad*®). Sin embargo, en estos softwares se presenta cierta incompatibilidad de formatos, herramientas y atributos, por lo que fue necesario exportar cada componente del modelado 3D hacia el entorno gráfico 2D. A este proceso se le llama etapa de diseño.

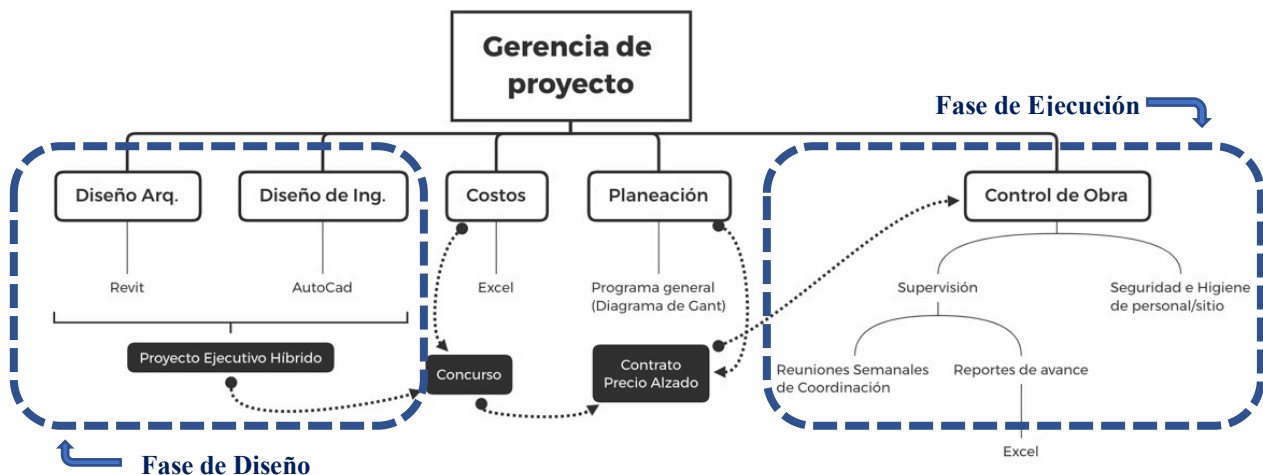


Figura 4.9. Esquema general del desarrollo del proyecto.

Dentro de las primeras fases del proyecto, se encuentra la fase de diseño, que comienza una vez obtenido el proyecto ejecutivo y con base en este, se comparte al departamento encargado de realizar los costos, quienes, a su vez, se encargan de realizar los concursos correspondientes.

Después, el departamento de planeación se encarga de formalizar con cada uno de los involucrados mediante un contrato a precio alzado, estableciendo las fechas de terminación del programa general representado en un diagrama de *Gantt*. A este proceso se le llama etapa de costos y planeación.

Para la etapa de ejecución, interviene el departamento de control de obra, quienes reciben la información generada en las etapas antes mencionadas y se encargan de llevar un control financiero en un archivo de *Excel*®, alimentado de los reportes de avances presentados por supervisión y a quienes los contratados les entregan un avance en hojas de papel impreso con la evidencia correspondiente (*i.e.* generadores de obra o estimación). También, utilizan el software *Enkontrol*®, pero únicamente con el módulo de administración, el cual solo proporciona herramientas para llevar un control financiero y contable.

El departamento de supervisión realiza reuniones semanales para coordinar a las distintas especialidades involucradas, con el fin de mantener los tiempos de entrega establecidos en el programa general, dar instrucciones sobre los trabajos a realizar, resolver situaciones suscitadas durante el tiempo transcurrido y dar indicaciones en temas de seguridad. Estas reuniones y coordinación no son gestionadas mediante ningún tipo de tecnología de integración o por medio de alguna metodología de gestión eficaz.

Posterior a esta explicación, el Arq. Carlos García proporcionó planos arquitectónicos y estructurales, sin embargo, aclaró que no se realizó ningún cruce de información, para detectar y planear el paso de todos los componentes de los edificios, incluyendo el paso de instalaciones de las distintas ingenierías contratadas. Del contenido de los planos, comentó que la información reflejada en estos se maneja con criterios generales, es decir, solo se presentan soluciones aplicables de manera general en cada uno de los sistemas constructivos utilizados y no de manera

detallada, donde se puedan referenciar diferentes situaciones específicas que se presentan en las interacciones con otros sistemas o instalaciones.

Lo anterior, así como el uso limitado de la tecnología, impidió visualizar, prevenir y resolver de manera eficaz las situaciones generadas durante el transcurso de la ejecución de la obra, que terminaron en retrabajos y reparaciones, causando gastos extraordinarios, mismos que se transforman en recursos adicionales y mayor generación de residuos. Estas situaciones se pudieron registrar gracias a que en la entrevista el Arq. Carlos García proporcionó un listado con costos adicionales y en algunos casos indicando volúmenes.

4.2.1. Estudio de proyecto ejecutivo y los problemas asociados al mismo

Una vez recibidos los archivos de *AutoCad*[®], se logró comprobar que se trataba de un proyecto desarrollado con recursos obsoletos, como es el uso de tecnología 2D y donde solo se utilizó el modelado 3D con el software *Revit*[®] para obtener imágenes fotorrealistas con objetivos meramente de mercadotecnia.

Que se trataba de un proyecto *Fast-Track* (*i.e.* inicio del proceso constructivo mientras el proyecto aún se encuentra en desarrollo), donde solo se resolvió de manera general, pero dejando de lado el atender los conflictos que podría suscitarse por la intervención de las distintas disciplinas participantes, así como el complementar detalles de casos específicos. Obteniendo con esto, un proyecto deficiente, que carece de información, que contiene errores, donde el Desarrollador o cliente, no pudo visualizar previamente las distintas soluciones propuestas. Estas deficiencias, representaron el 57% de los gastos por conceptos extraordinarios aplicables a esta etapa, que corresponden a omisiones, cambios de especificaciones, impactos ambientales y sociales.

Estos conceptos extraordinarios quedaron registrados en el archivo de control financiero del Desarrollador, el cual compartió para facilitar el estudio de este caso y de los que se menciona continuación:

A) Muro lambrin en pasillos

Se sustituyeron los paneles de madera de los muros lambrin de algunos de los pasillos (Fig. 4.10), decisión que tomaron porque una vez instalados los anteriores, revisaron la apariencia que estos generaban, no era de agrado para el cliente.



Figura 4.10. Muros con bastidor de madera para lambrin.

Lo anterior ocasionó que se tuvieran que retirar los ya instalados, lo que implicaba desechar los materiales utilizados, mismos que generarían residuos; utilizar mano de obra para estos retiros, así como los respectivos transportes; fabricación de nuevos paneles que requerían de recursos adicionales como son nuevos materiales, transportes y mano obra.

Se presentaron gastos equivalentes a \$1,032,290.58 MXN, mismos que podrían haberse evitado al hacer uso de la tecnología por medio de una imagen fotorrealista, así como también el contar con una mejor gestión que proporcionara muestras en una escala menor y de esta forma, se eviten estas situaciones.

B) Jardinería

Otro gasto extraordinario fue el de la jardinería de las áreas comunes, ya que, una vez terminada la instalación de lo contratado, el Desarrollador decidió cambiarla por cuestiones estéticas. Movimientos que implicaron reemplazos de vegetación, traslados y mano de obra, que sumaron gastos de \$736,513.73 MXN. De haber revisado a detalle desde proyecto por medio del uso de tecnología de modelado virtual, se podría haber evitado no solo el gasto económico que esto implicó, si no que también los impactos ambientales relacionados a mayores movimientos y uso de recursos necesarios para estos trabajos.

C) Cambio de losa de azotea plana a inclinada.

Una vez iniciado el proceso constructivo de este proyecto, fue el mismo despacho encargado del diseño de las torres habitacionales, quien solicitó se cambiara la geometría de la losa del piso 24. Paso de ser una losa plana a una losa inclinada, movimiento que, aunque no necesitó realizar trabajos de demolición, fue necesario utilizar mayores materiales y mano de obra agregando gastos por \$2,594,157.69 MXN.

Si bien, esta decisión podría dar la impresión de que solo afecta el aspecto económico, en realidad nos dice que la toma de decisiones está basada únicamente en las cuestiones estéticas, dado que fue el único argumento proporcionado por el entrevistado.

Esto nos habla de que, al no contar con información completa como se representa en los proyectos donde solo se utilizan recursos tecnológicos como es el *AutoCad*® 2D, el aspecto económico es el único disponible a la hora de la toma de decisiones.

D) Bastidor y placas para fachada de concreto prefabricadas.

Como se mencionó en la descripción del caso de estudio, algunas de las fachadas de los edificios son prefabricadas ([Fig. 4.11](#)). Sin embargo, la información de toma de decisiones al momento de seleccionar al proveedor no fueron suficientes, dado que no se revisó a detalle cómo se instalarían los paneles de concreto y la apariencia que estos generarían, por lo que una vez iniciados los trabajos, descubrieron estas características y decidieron que no era lo que tenían en mente, por lo que decidieron cancelar e iniciar el proceso con un nuevo proveedor, el cual obligaba a crear un bastidor adicional con un costo de \$1,139,362.80 MXN y gastos por sustituciones de los ya instalados por un monto de \$291,352.73 MXN.



Figura 4.11. Fachada prefabricada de paneles de concreto.

Esto representa de nuevo, una situación que se pudo evitar al contar con un proyecto y un equipo de trabajo que pueda poner a la mesa la información completa al momento de la toma de decisiones, sobre todo desde la etapa de diseño, que es cuando estos cambios lejos de ser un impacto negativo se vuelven a favor de quien los realiza.

E) Cristales en ventanales de fachadas.

Este fue un claro ejemplo de la calidad del contenido del proyecto, ya que aspectos tan básicos para un edificio de estas características, como es la especificación de los vidrios de las ventanas de fachadas (**Fig. 4.11**), no contemplaba la resistencia del material por las fuerzas del viento, por lo que se realizó el cambio durante el transcurso de la ejecución de la obra y no durante la etapa de planeación donde los costos y recursos pueden disminuirse, por lo que se adicionaron \$4,071,646.01 MXN al monto original de contrato, representando esto un aumento del 29% al presupuesto de esta partida.

F) Omisiones y cambios de especificación en elementos de cimentación.

Dentro de los adicionales presentados en este proyecto, también se encuentran los que corresponden a la partida de estructura y cimentación, si bien no representan sustituciones que generen mayor impacto ambiental por considerarse conceptos que pudieron evitarse, si representan gastos en recursos adicionales como son los transportes por materiales omitidos desde un inicio, además de que nos demuestra la falta de información contenida en los planos.

Omisiones y cambios que suman la cantidad de \$1,609,057.05 MXN, que incluyen conceptos como el de placas para anclajes, cambio de especificación en concretos y cambio de especificación en rellenos de cimentación.

G) Demolición de muro de concreto solido en colindancia con paso a estacionamiento.

La falta de visualización desde la fase de diseño de las distintas zonas que componen este proyecto, provocó que del Desarrollador solicitara la demolición de un muro de concreto que ya había sido terminado, pero que por razones estéticas se decidió demoler parcialmente (Fig. 4.12). Esto implicó utilizar equipo mecánico para corte y demolición, generación de residuos de concreto y acero, exposición de los trabajadores a trabajos que generan ruido y polvo, consumos de combustibles para los equipos, transportes de materiales y retiros del sitio de los residuos. Todo esto ocasiono que se gastara un monto adicional de \$390,000 MXN.



Figura 4.12. Demolición de muro de concreto.

H) Placas de anclaje de barandales

La falta de detalle del proyecto ejecutivo a las especificaciones de los productos propuestos como fue el caso de los barandales, propició que no se consideraran las placas para los anclajes de los barandales de los balcones, teniendo con esto, un impacto económico de \$454,498.04 MXN.

I) Estructura interna para elevadores

No se revisó la información de contrato con los proveedores de los elevadores y se asumió que la estructura secundaria que va en la parte interna del cubo de elevadores estaba incluida dentro del paquete de los equipos. Casi llegada la fecha de instalación la compañía de elevadores les indicó que era necesario dejaran lista esa estructura, por lo que se tuvo que hacer una compra improvisada de \$674,279.43 MXN.

J) Impermeabilización en balcones

De nuevo conceptos omitidos desde proyecto donde las especificaciones no indicaban impermeabilizante en los pisos de los balcones previo la colocación del recubrimiento de piso cerámico (Fig. 4.13). Concepto que tuvo que agregarse por un monto de \$565,547.12 MXN.



Figura 4.13. Impermeabilización de losas en balcones.

4.3. Investigación del sitio de construcción

Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizaron varias visitas al sitio para estudiar las actividades que ahí se realizaban por medio de observación directa, entrevista durante los recorridos y entrevista en la oficina del gerente de control de obra.

Este apartado refleja las condiciones en las que se encontraba el sitio de construcción al momento de estas visitas, la cual se puede apreciar en las Figuras 4.14a-c, así como los procesos constructivos llevados a cabo para la fabricación de los elementos estructurales del edificio. Por lo tanto, los datos aquí proporcionados, corresponden a la información disponible hasta el momento de las visitas.



a)



b)



c)

Figura 4.14. Fachadas de las Torres 1 y 2: a) Avance de construcción de Torre 2; b) Avance de construcción de Torre 1 y c) Fachada de muro de block en Torre 2.

4.3.1. Seguridad e higiene

El objetivo de este apartado es describir y evaluar la seguridad e higiene del sitio, con el fin de determinar las condiciones del espacio, para evaluar los riesgos laborales ocasionados por la falta de una correcta organización y gestión dentro del mismo.

En cuanto al tema de espacio se observó que el sitio del desarrollo habitacional carece de orden, limpieza y organización de actividades. Como se muestra en la **Figura 4.15**, se trata de áreas improvisadas donde se interponen materiales, herramientas, equipos, tránsito, residuos, personal y diferentes tipos de actividades sin algún orden aparente.



Figura 4.15. Área de construcción de la zona de estacionamiento.

Además, se aprecia la falta de orden y limpieza, donde no existe un límite claro entre las áreas para almacenamiento de materiales, circulación de vehículos, circulación peatonal, talleres, bodegas de herramientas, zonas para maniobras y rutas para movimientos de materiales.

Esto, causa que se vuelva un sitio riesgoso para los trabajadores y para cualquier visitante, provocando caídas, heridas ya sea por clavos o cualquier objeto punzocortante o pérdida de la vida por golpes o atropellamientos por la maquinaria de equipo pesado como las grúas. En relación con el tiempo de realización de las distintas actividades, se logró observar que no se contaba con un programa de actividades coordinadas, ni de un líder que se hiciera cargo de dirigir las. De acuerdo con la explicación del Arq. García, cada contratista se organizaba, pero no existía alguien que organizara a los contratistas. El encargado de supervisión, decía qué hacer, pero no llegaba al punto de organizar, dictaba compromisos, pero no decía cómo lograrlo. De manera que cada contratista trataba de avanzar al mismo tiempo que el resto, lo que generaba caos y desorden en las jornadas laborales. Esto propicia tener actividades traslapadas, con materiales abandonados, que solo logran obstaculizar todas estas actividades y que hacen que aumente el riesgo de accidentes, de modo que como se muestra en las Figuras 4.16a-b,



a)



b)

Figura 4.16. Madera de cimbra utilizada y acumulada sin ningún tipo de selección: a) puntales metálicos con piezas de madera utilizadas anteriormente y b) madera acumulada sin clasificar.

Para subir los materiales a cada piso, se utilizaba un solo elevador del que, quienes querían utilizarlo tenían que esperar largos periodos. También, hacían uso de la grúa torre y por medios manuales. El transporte del material era de manera manual, se realizaba con recorridos largos, pasando por distintas áreas donde estaban trabajando con andamios o escaleras instaladas. Actividades asociadas a riesgos de padecer algún tipo de lesión muscular o del sistema esquelético, por la exposición continua de cargas pesadas.

Adicional a esto, quienes se encontraban trabajando en la fachada fabricada de block, apreciándose en la **Figura 4.14c**, corren riesgos por trabajos en alturas, donde es necesario instalar andamios para una altura de hasta 70 metros y accidentes por ejecución bajo circunstancias meteorológicas y como se observa en la **Figura 4.17**, donde es necesario habilitar los materiales en sitio, ocasionando con esta actividad y todas las relacionadas con los cortes en piezas de concreto, riesgos en la salud de quienes la están ejecutando como de quienes se encuentran cercanos.



Figura 4.17. Corte de materiales con disco, sin equipo de protección.

Todos estos tipos de riesgos, se pudieron observar en todas las áreas de trabajo de este complejo, que se pueden atribuir a la mala gestión del proyecto y a la irresponsabilidad de aquellas personas que dirigen la gestión, como también de los que trabajan. Debido a que el desarrollador, encargados y supervisores de obra, deben priorizar la organización, señalización y protección de cada individuo que se encuentra involucrado.

4.3.2. Manejo de inventarios

Se revisó el tipo de material almacenado en el sitio, las condiciones de transporte, almacenamiento y el equipo utilizado para su movimiento, encontrándose lo siguiente. El área de resguardo de materiales que controla directamente el Desarrollador, se trata de un espacio semicubierto, al paso de vehículos, personas y maquinaria (Figs. 4.18a-b).



a)



b)

Figura 4.18. Área de almacenamiento de materiales: a) área de almacén y b) paso vehicular al área de almacenamiento.

Donde los materiales se colocan directamente sobre el suelo o en algunos casos sobre la tarima de madera en donde vienen empaquetados, pero sin protecciones que garantice su buena conservación. Adicional a este sitio, se encontraron materiales distribuidos por toda la obra, incluyendo sitios donde se acumulan residuos de la construcción.



a)



b)

Figura 4.19. Transporte de materiales dentro de la obra: a) por medios mecánicos y b) medios manuales.

Dependiendo del tipo de embalaje que utilice el proveedor, se decide si las descargas son de manera manual o mecánica (Figs. 4.19a-b), pero una vez colocados en los sitios designados, se abren los paquetes, se entrega a cada contratista y ellos a su vez se encargan de distribuirlos por la obra de manera manual según sus intereses.

Sin embargo, esto se realiza sin ningún plan maestro o de acuerdo con una programación de uso inmediato, es decir, se pudieron observar todo tipo de materiales distribuidos por toda la obra, sin protección, al paso del tránsito de personal y fuera del tiempo requerido. Lo anterior maximiza el porcentaje de desperdicios que se consideran dentro de lo normal para una construcción de estas características. Al tener materiales a lo largo del área de construcción, se fomenta la posibilidad de utilizarlos como “adecuaciones” para solucionar situaciones que pueden generarse en las etapas constructivas, lo que genera una alteración al inventario y que posiblemente no sea recuperado posteriormente.

Tomando esto en consideración y los descrito en el apartado anterior que habla sobre seguridad e higiene, donde se explican las condiciones de organización o en este caso, la desorganización en la que se encuentra el sitio, hace que se complique la selección y reutilización de los materiales, mismos que se desechan de la obra junto con el resto del escombros y basura.

4.3.3. Uso de los recursos

Durante el proceso constructivo se utilizan recursos naturales tales como energía, materiales pétreos, maderas y agua. Siendo estos consumos de gran impacto en el medio ambiente. Por este motivo se vuelve de principal importancia el monitoreo del buen uso de estos.

La cimbra, que, por el sistema constructivo, se utiliza para la elaboración de todos los elementos estructurales de edificios. De acuerdo con las características del complejo habitacional y a la información proporcionada por el entrevistado, se requieren alrededor de 65,158 metros cuadrados de cimbra de contacto para columnas, trabes y muros.

Estos, son adicionales a la cimbra metálica utilizada en otras secciones, tal como se muestra en la **Figuras 4.14a-c**, que para el cimbrado de las losas de entrepiso utilizan un sistema prefabricado de la marca *Doka*[®], a base de puntales metálicos, madrinas metálicas, largueros de madera, vigas de madera y para el resto de los componentes usaron cimbra con madera.

Esta cimbra de madera, podría ser utilizada de siete a nueve veces, esto en caso de tener muchos cuidados, aunque la práctica común dice que máximo se aprovecha 4 veces. A pesar de que la geometría de los edificios permite utilizar sistemas modulares estandarizados, donde las trabes mantienen las mismas dimensiones en todos los niveles, las columnas solo cambian de tamaño en cuatro ocasiones en la Torre 1 y en tres ocasiones en la Torre 2, decidieron utilizar un sistema de cimbrado híbrido que no presenta evidencia de contar con una planeación previa o diseño de los componentes, ya que se pudo observar que son de distintos tamaños e incluso sobredimensionados. Esta falta de planeación o diseño modular estandarizado, se ve reflejado al descimbrado de cada piso, donde al momento de descimbrar no se realiza una clasificación por sección, es decir, podría manejarse como un rompecabezas con claves que identifiquen a que elemento corresponde.

Mostrando con esto, el evidente mal uso de los recursos al desechar grandes cantidades de madera cortada en distintos tamaños como se refleja en las **Figuras 4.16 a-b**, donde la madera no se clasifica ni se ordena de acuerdo con el uso anterior. Dejando la decisión de reutilizarla, a los oficiales de obra, que por descuido o desinterés permiten que se desperdicie material útil o tienden a utilizar piezas muy dañadas que, al entrar en contacto con el concreto, generan elementos de mala calidad que deben ser detallados posteriormente.

Una vez que el oficial encargado, selecciona las piezas que considera reutilizables, acumulan los sobrantes junto con el resto de los residuos en montones (Fig. 4.20a) y por varios puntos dentro del mismo nivel en que se descimbró, posteriormente se traslada en un contenedor (Fig. 4.20b) hasta llenarse, para después, ser bajado por medio de la grúa torre ubicada en el sitio y vaciado en el lugar de acopio para ser transportado y desechado en sitios autorizados.



a)



b)

Figura 4.20. Área de almacenamiento de materiales en los pisos de las torres: a) acumulación de cimbra usada, nueva, basura, acerto, entre otros y b) contenedor de almacenamiento de residuos.

Considerando que la madera es un recurso cien por ciento reciclable, se podría pensar que no es grave el impacto ecológico que podría generar el utilizarla para este tipo de trabajos, sin embargo, al momento de desecharla no se clasificaba para reciclaje, sino todo lo contrario, se retiraba mezclada con el resto de los residuos de construcción, afectando directamente los suelos destinados a este propósito y evitando su aprovechamiento.

Lo anterior representó un gasto de madera aserrada por aproximadamente 291 metros cúbicos. Número que de acuerdo con la guía de ubicación de madera equivale a 918 árboles de 1.75 metros de diámetro por 9.30 metros de altura total (Gutiérrez *et al.*, 2013).

Esto nos indica la importancia de que exista una planeación donde se estudien los tipos y cantidad de piezas a utilizar, con procedimientos de instalación, desinstalación y reusó, previamente establecidos de una manera correcta y eficiente para garantizar la mayor productividad por pieza y disminuir el porcentaje de residuos involucrados en esta etapa constructiva.

4.3.4. Desperdicios

Los procesos de construcción llevados a cabo durante el periodo de análisis realizado, mostraron deficiencias en la integración y coordinación de la información entre las diferentes disciplinas participantes. Resultando con esto, daños, conflictos, modificaciones que a su vez generaron sobrecostos que además de afectar la economía de los inversionistas, también generaban mayor impacto ambiental al tener que agregar recursos adicionales y desechar mayores cantidades de residuos. Analizando esto bajo el enfoque de la metodología *Lean* (Sección 2.3), los siguientes fueron los desperdicios evidenciados durante el proceso de investigación de campo, identificados mediante la técnica de entrevista y con observación directa.

A) Retrabajos en losas de firmes y entrepisos.

En la Figura 4.21a se puede observar que se trata de superficies poco uniformes, lo que genera que algunas partes tengan mayor espesor y, por lo tanto, carente de una completa horizontalidad. Problema generado por la falta de supervisión y control de calidad de los trabajos contratados.

Esto obligó al Desarrollador a contratar los trabajos de una losa adicional para nivelar 21,912.11 metros cuadrados, de los cuales 9,721.31 se nivelaron con mortero de cinco centímetros de espesor y el resto con mortero de tres centímetros (**Figura 4.21b**). De acuerdo con la información proporcionada por el Arq. Carlos García, el costo de estos trabajos fue de \$3,527,850.09 MXN. Se requirieron 9,853 sacos de cemento, 1,382.56 metros cúbicos de arena, 243,431.15 litros de agua, transporte, equipo de elevación, herramientas y mano de obra adicionales.



a)



b)

Figura 4.21. Reparaciones adicionales en los firmes: a) losa de entrepiso con baja calidad y b) losa de nivelación adicional.

B) Retrabajo de cortes y demoliciones para paso de instalaciones de gas en losas de firmes y entrepisos.

En la tubería de las instalaciones para gas natural, se realizaron correcciones que consistieron en abrir una franja a la losa ya terminada, de aproximadamente 30 centímetros de ancho por 68 metros de longitud (distancia promedio) por cada nivel, en toda la Torre 1 y en seis niveles de la Torre 2 (**Figs. 4.22a**).

Esto como consecuencia de contar con un proyecto deficiente que no cumplía con la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010. Debido a que la gestión de los trabajos se manejó de manera independiente y no integral, se dieron cuenta de este error hasta que se encontraba terminada la Torre 1 y cuando el avance era una cuarta parte de la Torre 2.

Esta corrección requirió de trabajos de corte con equipo mecánico, demoliciones con equipo mecánico, acarreo de escombros al pie de la grúa torre, transporte de escombros hasta un tiradero y fabricación de mortero para rellenar los espacios vacíos entre las tuberías instaladas (Fig. 4.22b). Esto último requiere de materiales adicionales, trabajos de transporte de los materiales para fabricar este mortero hasta el sitio requerido, los cuales consisten en subir arena, cemento, agua, por medios manuales.



a)



b)

Figura 4.22. Cortes y demoliciones en losas de firme y entrepiso: a) áreas de corte y demolición para paso de tuberías de gas y b) fabricación de mortero en sitio para relleno de zonas abiertas para paso de tuberías de gas.

Además, todas estas modificaciones generan consumos de energía adicionales. Generación de grandes cantidades de polvo, traducéndose como contaminación auditiva tanto para los trabajadores como el entorno. Se presentan condiciones que ponen en riesgo la salud de los trabajadores, al no contemplar el uso de mascarillas para el polvo y por el movimiento excesivo de escombros en espacios reducidos, lo que impide el utilizar algún medio mecánico para facilitar la tarea. Además, los residuos producto de las demoliciones, son trasladados a tiraderos por medio de camiones, que representan un excedente dentro de los cronogramas de viajes designados a escombros y contribución negativa al medio ambiente por la generación de emisiones de CO₂ adicional. Estas modificaciones, representaron un monto: \$510,558.29 MXN y generaron residuos adicionales de 29.58 metros cúbicos de escombros.

C) Fabricación de cimbra para paso de instalaciones de gas.

Como se mencionó en el apartado anterior, la solución propuesta por los encargados de desarrollar la instalación de gas, no cumplía con la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010, por lo tanto, fue necesario corregir los niveles que ya tenían las losas terminadas. Sin embargo, a partir del nivel siete de la Torre 2, ya era posible encontrar una solución para no tener que ranurar. Para esta solución decidieron cimbrar el espacio por donde recorrerían estas tuberías, para provocar una profundidad en la losa que permitiera alojar los tubos sin tener una diferencia con el nivel de piso terminado (Figs. 4.23a-b).

Esto se debe a que el proyecto se manejó con sistemas tecnológicos obsoletos, como es el uso de dibujos en 2D, que volvían complicado integrar la nueva solución de la instalación de gas con el sistema constructivo de las losas. Razón por la cual optaron por no perder tiempo y darle una solución que, aunque no era la mejor, les permitía continuar con el ritmo de la obra.

Estas modificaciones, representaron un monto: \$128,268.33 MXN. Se generaron una gran cantidad de residuos como madera producto de la cimbra.



a)



b)

Figura 4.23. Cimbra para pasos de instalaciones de gas: a) área de paso de tuberías después de retirada la cimbra y b) relleno de paso de tuberías con mortero.

D) Reemplazo de tubería de cobre.

Una vez solucionada la parte del alojamiento de las tuberías de gas, la siguiente actividad fue la de instalar los tubos de cobre para la cual estaría destinado. Sin embargo, la falta de coordinación y previsión del momento correcto en que estas actividades debieran suceder, provocó el traslape de actividades que permitían el tránsito de los trabajadores por los sitios donde ya se encontraba instalada esta. En la **Figura. 4.24.** se puede observar como el personal dedicado a otras actividades, se encuentran trabajando sobre las tuberías, lo que ocasionó el daño de estas.

De acuerdo con la información proporcionada por el entrevistado, se requirieron aproximadamente 2,740 metros de tubería de cobre, lo que equivale a 450 tramos de 6.10 metros cada uno.

Esto, generó un retiro (acarreo y transporte fuera de la obra) de la tubería dañada y reemplazo por nueva, con un costo de \$372,249.34 MXN y generando residuos de 2,739 metros de tubería de cobre (aproximadamente 60 metros lineales por piso).



Figura 4.24. Trabajos sobre la instalación de tubería de gas.

E) Cubiertas para lavamanos

Las cubiertas de cristal de 120 lavamanos tuvieron que ser reemplazadas por sufrir daños al ser colocados en los departamentos, antes del tiempo correcto, es decir, otras disciplinas seguían trabajando en el sitio. Esto ocasionó que, de las 256 cubiertas instaladas hasta el momento de la visita, se dañaran 120.

Para solucionarlo fue necesario recolectar y desechar los restos de los materiales dañados (residuos de vidrio), comprar de nuevo esas piezas y transportarlas desde China. Se generó un

gasto adicional de \$ 245, 436.40 MXN, con residuos de 0.60 metros cúbicos de vidrio (transportarlo y desecharlo).

F) Reposición de mármol utilizado como recubrimiento en pisos.

Como se mencionó en la **Sección 4.3.2**, en el manejo de los inventarios dentro del sitio de construcción, no protegen los materiales ahí depositados y quedan expuestos al tránsito de personal y de maquinaria (**Figura 4.25**). También las condiciones de embalaje desde el proveedor no eran las adecuadas y al momento de las descargas se terminaban rompiendo varias piezas. Adicional a esto, la mala calidad con la que fueron instaladas estas piezas, provocaba que, al momento de pisar, algunas se rompieran por lo que debían ser reemplazadas. Como consecuencia de todo esto, se tuvieron que comprar de nuevo, 2,834 m² de piezas de mármol, traducéndose en un monto de \$ 848,201.38 MXN.



Figura 4.25. Área de almacenamiento de materiales de mármol: (a) piezas de mármol apiladas en zona de almacén; (b) Piezas de mármol en pasillo de Torre 2.

G) Muro de contención en límite con fase 3

La falta de un análisis apropiado del proyecto y sus fases, generaron que se diera una solución que resolvía el problema inmediato pero que traía consigo gastos adicionales, mayor uso de recursos y mayor generación de residuos. Esto fue, el fabricar un muro de contención al límite de la segunda fase con la tercera, mismo que será demolido al inicio de esta última. Este muro se construyó de concreto armado, con un espesor de 20 cm por 15 metros de longitud y por 14 metros de altura (monto: \$ 1,677,185.61 MXN).

H) Lijado de trabes de concreto

La falta de supervisión al momento del colado de los elementos estructurales que quedarían con materiales aparentes como es el caso de las trabes de concreto, así como el uso indebido de materiales en malas condiciones como fue la cimbra de madera, ocasionaron que después de retirada la cimbra fuese necesario retirar los restos de concreto que ocasionaban que la pieza se viera con superficies no lisas (monto adicional de \$ 139,994.68 MXN).

I) Relleno y calafateo en uniones de diferentes sistemas constructivos.

El planteamiento general de los sistemas constructivos utilizados en este proyecto y la falta de una adecuada solución desde que se diseñó, ocasionan que en sitio se tengan que resolver situaciones sobre la marcha, como fue el caso de las uniones de los muros con las trabes y columnas. Se tuvieron que rellenar con poliestireno, mortero y selladores como muestra en la **Figura 4.26**. Para estos trabajos fue necesario utilizar poliestireno cortado en sitio, pasta para resanes y mano de obra adicionales generando un monto de \$ 136,146.65 MXN.



Figura 4.26. Relleno y calafateo en uniones.

J) Reparación de elementos estructurales de concreto aparente.

La falta de supervisión al momento de los colados de los elementos estructurales, generó que algunas de las piezas quedaran con imperfecciones y perforaciones por la falta de vibrado del concreto. Razón por la cual fue necesario resanar esas partes, para darle apariencia uniforme (Fig. 4.27). Para estos trabajos fue necesario utilizar equipo de elevación como andamios, mismos que fueron transportados al sitio de los trabajos por medio de la grúa torre. Así, como también resanar con pasta tipo mortero, generando un monto de \$ 178,719.49 MXN.



Figura 4.27. Adecuación y detallado de elementos estructurales que no cumplían con la calidad de acabado aparente.

K) Materiales

Como se muestra en las Figuras 28a-b, se pueden apreciar materiales sin clasificar, almacenados sin el correcto cuidado y distribuidos no solo en el sitio destinado para los mismos, si no por toda la obra. También fue evidente que no se lleva un registro de las entradas y salidas de almacén de estos materiales, ya que cualquiera podría hacer uso de ellos y tomarlos sin previa autorización. Lo que causa pérdidas de materiales, por contaminación con otros materiales, daños por inclemencias del tiempo, por derramamientos y robos.



a)



b)

Figura 4.28. Área de almacenamiento irregular de materiales: a) área de almacén y b) Sacos de yeso en un pasillo de la Torre 2.

4.3.5. Gestión de residuos

Por otro lado, en la cuestión de los residuos, se logró observar que, dentro del sitio de construcción, no existe un área delimitada para su gestión, que promueva un adecuado acopio dentro de la obra y su debida separación. Se identificaron dos zonas de acopio donde se mezclaban materiales de excavación, residuos de concreto, escombros, maderas, cerámicos, plásticos, yesos, entre otros. Junto a estas áreas de acopio se encontraban materiales nuevos, tirados en el suelo y sin ningún tipo de protección o señalización.

Solamente se encontró una zona para el reciclaje de acero y metales (*Fig. 4.29*), que de acuerdo con la información proporcionada por el Arq. Carlos García, solo reciclaron algunos de los metales (menos del 4% de los residuos totales). Se arrojaron 29,127 metros cúbicos (hasta el avance de las visitas 2018-2019) de escombros y basura al medio ambiente, equivalente a 2,081 viajes en camiones de 14 metros cúbicos a una distancia de 17.10 kilómetros (distancia al tiradero autorizado y con regulaciones de ley más cercano) y con un gasto económico aproximado de \$3,133,416.66 MXN.



Figura 4.29. Área general de almacenamiento de materiales.

De acuerdo con el Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición promovido por la CMIC para contribuir a alcanzar las metas ambientales establecidas en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013-2018 y como parte de la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, donde se contempla como una obligación para los constructores que generen más de 80 metros cúbicos de residuos en sus obras, la formulación y desarrollo del respectivo plan de manejo, estipula que se debe minimizar la generación de residuos por medio de estrategias que lo promuevan, que van desde el incremento en el empleo de materiales que se puedan reciclar, hasta la separación de los mismos, con el fin de potenciar su aprovechamiento y/o reciclaje.

Contrario a esto, el manejo del complejo habitacional trae consigo diversos problemas ambientales, de imagen urbana y salud, como es la afectación a la flora y fauna del sitio de disposición final, creando focos de contaminación por mezcla de residuos, proliferación de polvo que provoca enfermedades respiratorias, CO₂ por transporte de residuos al sitio, entre otros tantos problemas relacionados.

4.4. Potencial para prefabricados

El sistema constructivo utilizado en los núcleos de elevadores, en los muros divisorios de los departamentos, las mochetas para las puertas principales y en algunas de las fachadas, es de bloque hueco, castillos y dalas (Figs. 4.30a-b). Sistema que se vuelve complicado por tener que elaborarse entre losas ya construidas lo que genera que se tengan que dejar espacios de maniobra (colado de concreto) que posteriormente cubren con poliestireno inyectado y cortado después de que seque.



a)



b)

Figura 4.30. Sistema constructivo a base de bloque hueco, castillos y dalas: a) almacenamiento de bloques huecos por piso y b) elaboración de muros.

Aunque este módulo de elevadores es igual en todos los pisos, no utilizan la misma cimbra de un piso a otro, ya que al momento de la visita estaban sacando dimensiones y cortando en sitio para colocarla. Adicionalmente, es necesario subir materiales a cada piso por medio de equipos de elevación en varias ocasiones ya que no solo tienen que subir los bloques, sino también el material para fabricar el concreto, el mortero, el armado y la cimbra necesaria.

Al ser elementos repetitivos, con las mismas características y dimensiones en todos los pisos, es posible utilizar elementos prefabricados que promuevan la optimización de los recursos utilizados y con esto, lograr un menor impacto ambiental. Con el uso de estos prefabricados se podría reducir el uso de equipo de elevación, desperdicios de materiales por daños en los acarreos o al almacenarlos en los sitios de la instalación, desperdicios por métodos constructivos como son los sobrantes de los morteros de las juntas utilizadas entre un bloque y otro o por las adaptaciones (cortes) realizados en sitio con herramientas improvisadas.

4.5. Análisis y discusión

La evidencia del caso de estudio demuestra que el esquema de trabajo utilizado en el desarrollo y edificación de este proyecto, carece de los actores, herramientas y controles adecuados para lograr evitar situaciones extraordinarias que generan mayor uso de recursos, aumento en la generación de residuos y en los riesgos a la salud de quienes participan en ella.

Este esquema de trabajo, también llamado gestión de proyecto, fue definido en el 2013 por el Instituto de Gestión de Proyectos (PMI, por sus siglas en inglés), como el uso de todos los conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas para la ejecución de proyectos de eficaces y eficientes (Acevedo, 2020). Sin embargo, el proyecto seleccionado fue manejado disfuncionalmente, ya que no se contaba con acceso oportuno a la información, ya sea por las limitantes de las herramientas utilizadas, así como la participación de diferentes actores con intereses propios y no en favor de todos.

4.5.1. Gestión del proyecto

Pons (2014), explica que este tipo de manejo de proyectos trae consigo una serie de problemas llamados “típicos” por ser una constante en las obras llevadas a cabo de esta manera. En este manejo de proyectos se presentan problemas debido a la limitada gestión de las herramientas utilizadas tradicionalmente junto con la negación de implementar nuevas opciones para incrementar la productividad. También, se produce un control de calidad deficiente, al apostar por utilizar métodos estadísticos que no contemplan las posibles interferencias y conflictos entre las etapas constructivas. La seguridad pasa a segundo plano, al no hacer obligatorio el uso de sistemas de seguridad para los trabajadores.

Además, se generan interferencias por la falta de coordinación entre los actores que intervienen en el proyecto, al presentarse poca o nula comunicación entre las partes que contribuyen al desarrollo de las primeras etapas del proyecto, con los generadores de las distintas etapas constructivas. Esto genera la necesidad de realizar adecuaciones al momento, que pudieron haberse previsto desde los inicios del proyecto, traduciéndose directamente en una pérdida considerable en la productividad total, a comparación de otras industrias.

En la [Tabla 4.1](#) se aprecian los 24 problemas que se presentaron en este proyecto, que, al sumarse a la falta de análisis integral en el proceso de diseño, se generaron conflictos que terminaron en sobrecostos que resultan de la compra, transporte y suministro de materiales adicionales, mano de obra, generación y retiro de residuos, uso de maquinaria y herramientas entre otros. El problema que generó mayor cantidad de sobre costos (\$ 4,071,646.01 MXN), se trata de la adquisición de cristales con mayor resistencia a las acciones generadas por el viento ([Fig. 4.11](#)), que se produjo por no haber considerado el cálculo de vientos para las fachadas. Seguido por la renivelación de firmes y losas de entrepiso ([Fig. 4.21](#)), generadas por la falta de control de calidad y una supervisión deficiente.

Por otro lado, el problema que menor sobre costos generó, fue la fabricación de cimbra para los pasos de instalación de gas con un monto de \$ 128,268.33 MXN. Este problema, pudo haberse solucionado desde la etapa de diseño o preconstrucción, al identificar la incompatibilidad con el sistema constructivo implementado.

Los porcentajes totales se concentran en dos columnas al final de la [Tabla 4.1](#). En las columnas de la derecha, se muestran los porcentajes respecto al total generado por la sumatoria de

los 24 sobre costos, englobándose en cuatro clasificaciones de problemas como la omisión de detalles, cambio de especificaciones, retrabajos y una interacción de estas dos últimas.

Tabla 4.1. Resumen de problemas encontrados en el caso de estudio.

Resumen de gastos extraordinarios								
Problema	Clave	Concepto	Causa	Correctivo aplicado	Impacto Ambiental	Impacto social	Impacto económico	Etapas preventiva
Retrabajo	1	Muro lambrin en pasillos	Falta de visualización desde proyecto	Reemplazo de lambrin de carpintería	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	Mayor exposición a daños a la salud de los trabajadores por movimientos de materiales y herramientas pesadas	\$1,032,290.98	Preconstrucción
Retrabajo	2	Jardinería	Falta de visualización desde proyecto	Retiro de lo ya instalado por una propuesta nueva	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes, aumento en la generación de residuos.	No identificado	\$736,513.73	Diseño
Cambio de especificación	3	Cambio de losa de azotea plana a inclinada	Falta de visualización desde proyecto	Modificación en elementos estructurales	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía.	No identificado	\$2,594,157.69	Diseño
Cambio de especificación/ Retrabajo	4	Bastidor para fachada prefabricada de concreto.	Cambio de proveedor porque el anterior no cumplía con la calidad esperada.	Modificación de planos y orden de cambio contratado	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria.	No identificado	\$1,139,362.80	Preconstrucción
Cambio de especificación	5	Fachada de placas de concreto prefabricadas	Cambio de proveedor porque el anterior no cumplía con la calidad esperada.	Cambio de proveedor	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria.	No identificado	\$291,352.73	Preconstrucción
Omisión	6	Cristales ventanales fachadas en de	No se consideró el cálculo de vientos	Modificación en la solicitud de compra	Sin mejoras en innovaciones sustentables, falta de visión integral en temas de sustentabilidad.	No identificado	\$4,071,646.01	Diseño
Cambio de especificación	7	Cambio de resistencia en concreto de torones de F'C= 300 kg/cm2 a 350kg/cm2	Error en el cálculo por omisión de datos	Modificación en la compra	No identificado	No identificado	\$223,543.19	Diseño
Cambio de especificación	8	Cambio en diseño de rellenos de cimentación	Error en el cálculo por omisión de datos	Modificación de planos y orden de cambio contratado			\$155,647.64	Diseño
Cambio de especificación	9	Cambio de resistencia en concreto de estructura F'C=300 kg/cm2 a 350 kg/cm2.	Error en el cálculo por omisión de datos	Modificación de planos y orden de cambio contratado			\$967,264.26	Diseño
Omisión	10	Anclas cimentación en	Error en el cálculo por omisión de datos	Compra adicional y cambio de especificaciones en resistencia del concreto (monto de esto último considerado en los conceptos de cambios).			\$262,601.96	Diseño
Cambio de especificación/ Retrabajo	11	Demolición de muro de concreto en colindancia con paso a estacionamiento	Falta de visualización previa a la ejecución	Corte y demolición de muro	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	Riesgos a la salud de los trabajadores	\$390,000.00	Diseño
Omisión	12	Placas de anclajes de barandales	Falta de análisis en el diseño y cruce de información con proveedores	Compra adicional	No identificado	No identificado	\$454,498.04	Diseño
Omisión	13	Estructura interna para elevadores	No se revisó la información del proveedor de elevadores y se asumió con incluido en la compra del equipo.	Contrato adicional	No identificado	No identificado	\$674,279.43	Preconstrucción
Omisión	14	Impermeabilizante en balcones	No se consideró la aplicación de impermeabilizante bajo el recubrimiento cerámico. Error de diseño.	Compra adicional	No identificado	No identificado	\$565,547.12	Preconstrucción
Retrabajo	15	Renivelación de firme y losas de entpiso	Falta de control de calidad (supervisión)	Fabricación de 21,912.11 m2 de piso de mortero con espesor de 3 a 5 cms de espesor.	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	Mayor exposición a daños a la salud de los trabajadores por movimientos de materiales y herramientas pesadas	\$3,527,850.09	Construcción

Resumen de gastos extraordinarios (continuación)								
Problema	Clave	Concepto	Causa	Correctivo aplicado	Impacto Ambiental	Impacto social	Impacto económico	Etapas preventivas
Omisión	16	Cortes y demoliciones para paso de instalaciones de gas en losas de firmes y entresijos	Ocasionado por un proyecto deficiente, la solución considerada en proyecto no cumplía con la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SECRE-2010.	Ranuras para abrir paso a una franja de 30 cms de ancho por 68 metros de longitud promedio por cada nivel. Aplicable a toda la torre 1 y 6 niveles de la torre 2.	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	Riesgos a la salud por exposición de polvos tóxicos y por movimientos de materiales y herramientas pesadas	\$550,558.29	Diseño/ Preconstrucción
Omisión	17	Fabricación de cimbra para paso de instalaciones de gas.	Errores en la solución contenida en los planos de instalaciones de gas y la compatibilidad de la nueva solución con el sistema constructivo utilizado.	Fabricación de cimbra de madera y relleno con mortero en entresijos de la torre 2 desde el nivel 7 al 23. Dando un total de 1,603 metros lineales.	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía.	No identificado	\$128,268.33	Diseño/ Preconstrucción
Retrabajo	18	Reemplazo de tuberías de gas.	Traslado de trabajadores para la realización de otras actividades, así como para llevar materiales. Esto debido a la falta de coordinación y supervisión.	Reposición de 2,739 metros de tubería de cobre.	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	No identificado	\$372,249.34	Construcción
Retrabajo	19	Compra e instalación de cubiertas de cristal para lavamanos	Colocación de cubiertas antes del tiempo correcto. Falta de coordinación y programación de actividades.	Compra a proveedor en China de 120 cubiertas de cristal de 0.60 m por 1.00 m. Transporte aproximado de 13,085 kilómetros.	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	Mayor exposición a daños a la salud de los trabajadores por movimientos de materiales y herramientas pesadas	\$245,436.40	Construcción
Retrabajo	20	Reposición de mármol utilizado como recubrimiento en pisos.	Mal manejo de inventarios (almacenamiento) y retrabajos por mala colocación.	Compra de 2,834 m2 de mármol	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	Mayor exposición a daños a la salud de los trabajadores por movimientos de materiales y herramientas pesadas	\$848,201.38	Construcción
Omisión	21	Muro de contención (no permanente ya que será demolido al inicio de fase 3)	Falta de planeación de las etapas del proyecto.	Fabricación de muro de concreto reforzado con acero, de 20 cms de espesor por 15 metros de longitud y 14 metros de altura. Incluye cimentación.	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía, mayores emisiones de CO2 por el uso de transportes y maquinaria, aumento en la generación de residuos.	Riesgos a la salud por exposición de polvos tóxicos y por movimientos de materiales y herramientas pesadas	\$1,677,185.61	Preconstrucción
Retrabajo	22	Lijado de trabes de concreto	Falta de supervisión y utilización de madera en mal estado.	Mano de obra para lijado de elementos estructurales de concreto	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía.	Riesgos a la salud por exposición a polvos tóxicos	\$139,994.68	Construcción
Omisión	23	Relleno y calafateo en uniones de diferentes sistemas constructivos.	Uso de sistemas constructivos independientes, falta de estrategia para resolver desde diseño.	Colocación de poliestireno y sílicon en uniones	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía.	No identificado	\$136,146.65	Preconstrucción
Retrabajo	24	Reparación de elementos estructurales de concreto aparente.	Falta de supervisión al momento del colado del concreto (faltó vibrar adecuadamente).	Resane de huecos con pasta cementosa.	Aumento en el uso de materiales, mayor consumo de energía.	No identificado	\$178,719.49	Construcción
				Total	\$21,363,315.84			
Diseño			\$9,855,872.52	46%	Omisión	\$8,520,731.44	40%	
Preconstrucción			\$5,516,165.32	26%	Cambio de especificación	\$4,231,965.51	20%	
Diseño/ Preconstrucción			\$678,826.62	3%	Cambio de especificación/ Retrabajo	\$1,529,362.80	7%	
Construcción			\$5,312,451.38	25%	Retrabajo	\$7,081,256.09	33%	

En estas columnas (*i.e.* de la derecha), se puede apreciar que el 40% de los 24 problemas corresponden a omisiones de proyecto; 33% a retrabajos por falta de supervisión de calidad, coordinación entre actividades y descuidos; 20% por cambios de especificación que en la mayoría de los casos fueron ocasionadas por falta de información y un 7% de la combinación de cambios de especificaciones con retrabajos.

En las columnas de la izquierda, se encuentran los porcentajes de los montos generados por los problemas que pudieron haberse solucionado en las clasificaciones de las etapas preventivas. Es decir, de los 24 problemas presentados, un 46% podría resolverse desde la etapa de diseño; 26% desde preconstrucción; 25% durante la ejecución o etapa de construcción y un 3% que resulta de la combinación de diseño y preconstrucción.

Lo anterior nos proporciona una guía de las etapas y los procesos que deben tener atención inmediata si se quiere controlar el uso desmedido de los recursos y que tomando en cuenta el impacto ecológico que, por si solo genera el edificar, este tipo de gestión lo hace mayor.

4.5.2. Seguridad e Higiene

Durante las visitas realizadas al sitio de construcción se pudieron observar situaciones donde se incurría en faltas a las Normas Mexicanas: “**NOM-001-STPS-1999**, Edificios, Locales, Instalaciones y áreas en los centros de trabajo-condiciones de seguridad e higiene”, específicamente en los apartados número siete, de nombre “Requisitos de seguridad de áreas y elementos estructurales”, que especifica sobre la conservación y orden de las áreas de trabajo. El apartado 8.3, que trata de la seguridad para las circulaciones los trabajadores y los equipos de transporte, mencionando que estas se encuentren libres de agujeros, astillas, clavos y pernos que sobresalgan, válvulas, tubos salientes u otras protuberancias que puedan causar riesgos.

También, para el apartado número 10, sobre los requisitos de seguridad para el tránsito de vehículos, donde se solicita que el tránsito de vehículos sea independiente del peatonal y de no contar con esta opción se deberá tener señalización. Además, se incumple con la **NOM-006-STPS-2014**, “Manejo y almacenamiento de materiales-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo”, principalmente en los apartados sobre los procedimientos del transporte de materiales de manera manual, en función de proteger la salud de los trabajadores. Lo anterior no solo refleja la falta de un órgano regulatorio que imponga sanciones por falta de cumplimiento a las normas, sino también la necesidad de que los particulares implementen metodologías que además de que aseguren el cumplimiento de estas, generen beneficios a quienes las ejerzan.

4.5.3. Manejo de inventarios

Se identificaron grandes desperdicios de acuerdo con la evidencia mostrada en la **Sección 4.3.2**, donde el sitio para el almacenaje de materiales se encontraba al paso del tránsito vehicular y peatonal, sin ningún tipo de protección o delimitación para su resguardo, así como tampoco contaba con algún encargado responsable de su cuidado, registro en entradas y salidas, adecuado embalaje, apilamiento, orden o clasificación (*e.g.* de acuerdo con su uso, frecuencia o tipo) de materiales en almacén. Estas circunstancias se traducen en pérdidas que de acuerdo con **Romero (2018)**, quien indica que para poder disminuir los desperdicios y lograr que un proyecto sea rentable, es necesario que los procesos productivos de construcción como en cualquiera otra industria, cuenten con la cantidad de materiales en el tiempo que se requieren, ni antes ni después. Es por eso por lo que se vuelve importante disponer de un sistema de control y gestión de flujos de materiales y suministros, que puedan ser monitoreados y analizados.

Esto se puede solucionar por medio de la implementación de tecnologías y el uso de metodologías para una adecuada gestión de recursos, que logran transformar las deficiencias o las actividades extraordinarias (*i.e.* transportes de materiales adicionales o retiros de escombros) en beneficios de ahorro en tiempo y materiales (Romero, 2018).

4.5.4. Uso de los recursos y su gestión como residuos

Como se comentó en la Sección 4.3.3, los sistemas constructivos, así como los materiales auxiliares para elaborar elementos o componentes de los edificios, mostraron la falta de planeación para garantizar un aprovechamiento máximo de los recursos. Claro ejemplo fue el de la cimbra híbrida utilizada, formada por elementos metálicos y elementos de madera, donde la repetición sistemática de áreas con las mismas características geométricas permitía la modulación y utilización de piezas que pudieran reutilizarse sin la necesidad de hacer alguna modificación. De modo que, al hacer buen uso de estas, se aseguraba el máximo aprovechamiento.

Contrario a esto, la mala gestión del proyecto lo llevó a desperdiciar estos recursos, no solo en el tema de la reutilización, también al momento de desecharlo, puesto a pesar de que, en el caso de la madera, es un material 100% reciclable, este se mezclaba con el resto de los residuos como el escombros y la basura, para terminar en un vertedero municipal. Residuos que hasta el avance de las visitas fue de 29,127 metros cúbicos y del cual solo se recicló menos de un 4%.

Esto refleja la necesidad de una correcta planeación y diseño, que aseguren el aprovechamiento máximo de todos sus componentes, así como un plan de gestión de residuos que busque separarlos de acuerdo con el tipo de reciclaje, de manera que sea mínimo lo enviado a vertederos municipales.

Capítulo 5 – Propuesta de gestión

5.1. Descripción

Dentro de los objetivos de la metodología *Lean* se encuentra la búsqueda de causas que generan los desperdicios en obra. De acuerdo con la clasificación de *Taiichi Ohno*, en las empresas manufactureras y especialmente en el sector de la construcción, se evidencian siete tipos de desperdicios en la operación, más el desperdicio de talento definido por *Jeffrey Liker* (Pons, 2014), que deben ser eliminados o minimizados por medio de la filosofía *Lean*, los cuales se describen a continuación:

- Sobreproducción: Se hace más de lo necesario en el momento, se adelanta en una actividad que posteriormente debe esperar para ser alcanzada por su actividad sucesora.
- Esperas o tiempo de inactividad: Esperas o interrupciones por falta de material, planos, información, contratistas, maquinaria, accidentes por falta de seguridad, retrabajo por cambios de diseño o mala calidad, son desperdicios.
- Transporte: Se refiere a las actividades que involucran a la logística, que al no planear de manera correcta los materiales que deben estar en obra, se incurre en sobrecostos de transporte, pérdida de materiales, de energía, de horas de trabajo o de espacio dentro de la obra.
- Sobre procesamiento: Son los procesos adicionales en la construcción o instalación de elementos que causan el uso excesivo de materia prima, equipos, energía, etc.
- Exceso de inventarios: Se refiere a inventario innecesario o antes de tiempo, que termina deteriorándose, volviéndose obsoletos, terminando en pérdida ya sea por un mal almacenaje, robo o vandalismo.
- Movimientos innecesarios: Mover constantemente elementos que no son necesarios en el momento.
- Defectos de calidad: estos se dan por errores en los planos desde diseño; falta de cruce de información con planos estructurales o de ingenierías: uso de procedimientos

constructivos incorrectos, mano de obra poco cualificada. Resultando esto en retrabajos.

- Talento: Son las pérdidas que se generan al no aprovechar las ideas o aptitudes de empleados a quienes no se les escucha, motiva o informa. También, se refiere a los casos donde se tiene mano de obra mal cualificada.

Desperdicios que inciden negativamente sobre la productividad en proyectos de construcción, siendo las siguientes situaciones las más recurrentes:

- Errores en los diseños y falta de especificaciones.
- Modificaciones a los diseños durante la ejecución del proyecto.
- Falta de supervisión de los trabajadores.
- Agrupamiento de trabajadores en espacios muy reducidos (sobrepoblación en el trabajo).
- Alta rotación de trabajadores.
- Condiciones deficientes de seguridad industrial que generan altas tasas de accidentes.
- Composición inadecuada de cuadrillas de trabajo.
- Distribución inadecuada de los materiales en obra.
- Falta de materiales requeridos.
- Falta de suministro de equipos y herramientas.
- Lotes con condiciones difíciles para su desarrollo.
- Excesivo control de calidad.
- Clima y condiciones adversas en la obra.

En la **Sección 4.6**, se presentó evidencia de que los defectos mencionados y estudiados dentro de la metodología *Lean*, fueron las principales causas de pérdidas y sobre costos por ineficiencias que terminaron en uso de mayores recursos, daños ambientales y sociales. Los cuales generaron montos considerables en sobre costos, que afectan directamente en la utilidad del contratista o desarrollador.

En ese sentido, la optimización de metodologías *Lean*, que resultan en la utilización de menor cantidad de recursos, reducción de retrabajos, disminución de costos de energía, agua y materiales, así como la mejora considerable de la calidad de un proyecto, son las que generan un camino hacia la sustentabilidad (Piercy, 2015).

Esta optimización, generada por *Lean* y aportada por la metodología BIM, son las que ayudan a cumplir con los objetivos de este TOG, donde por medio del uso de las herramientas más apropiadas para gestionar de una mejor manera este proyecto y los de características similares, se puedan obtener beneficios ambientales, que ayuden a reducir el consumo innecesario de recursos de construcción, así como también el reducir la producción de residuos de construcción.

De ese consumo innecesario, casi el 50% corresponde problemas arrastrados desde la etapa de diseño y el resto a las etapas posteriores, lo que indica que es indispensable hacer frente a todas.

Es por eso, por lo que se propone un nuevo esquema de gestión de proyectos (Figura 5.1), donde a diferencia del utilizado, se integra la etapa de preconstrucción. Planteándose cuatro etapas que inician desde el diseño del proyecto hasta la ejecución.

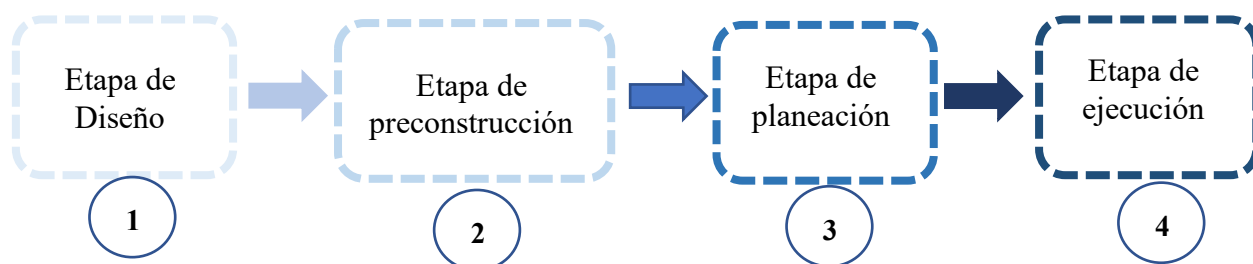


Figura 5.1. Propuesta de gestión de proyectos con metodologías BIM-Construcción-*Lean*.

Se propone utilizar IPD (por sus siglas en inglés *Integrated Project Delivery*), como herramienta integradora de todas las etapas, procesos, actores participantes en el proyecto y como factor potenciador de las herramientas propuestas durante todo el ciclo de vida del proceso de edificación, desde el diseño hasta la ejecución.

IPD es una evolución del *Lean Project Delivery System*, tratándose de una herramienta que de acuerdo con **Lean IPD (2019)**, es un modelo de entrega para el diseño y la construcción de proyectos de capital basados en la alineación de equipos a través de una estructura de contrato, lo que les permite colaborar e incentivarlos a reducir el costo de los proyectos, al tiempo que ofrecen el programa y la calidad acordados por el propietario. A diferencia de la gestión tradicional (**Figura 5.2**) donde los actores intervienen en distintas etapas, con IPD se promueve la incorporación temprana de todos los actores (**Figura 5.3**), logrando con esto una oportunidad de optimizar recursos. Ya que estos, pueden influir en la toma de decisiones al aportar conocimientos en las áreas de su especialidad.

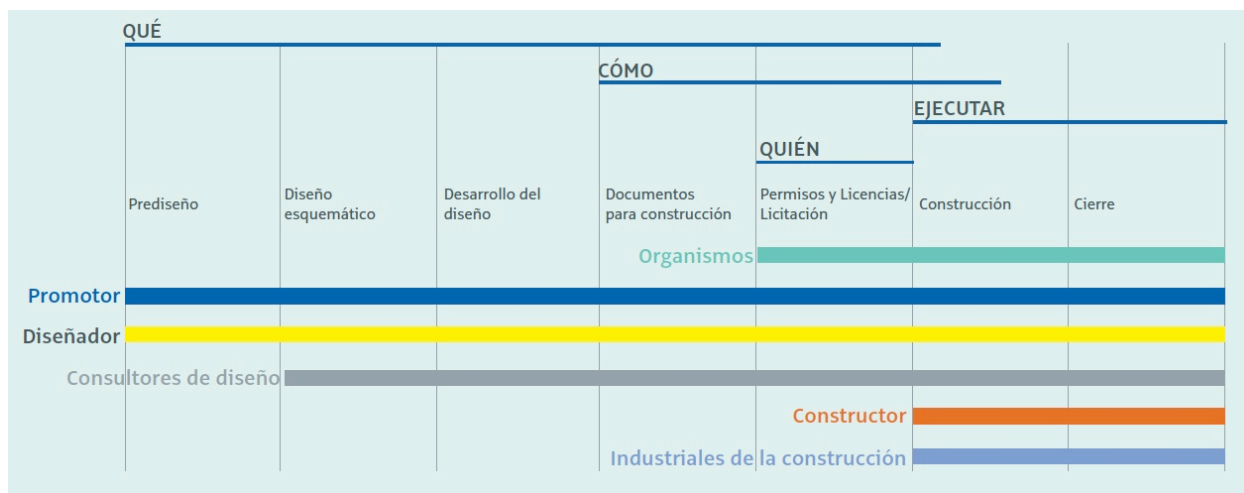


Figura 5.2. Proceso tradicional de la gestión de proyectos constructivos (Pons, 2014).

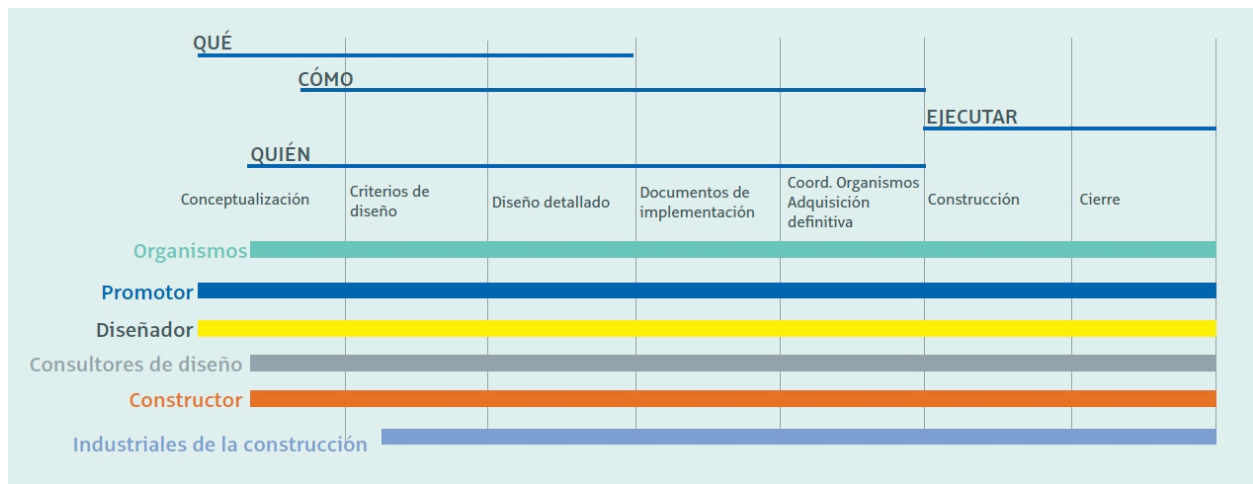


Figura 5.3. Proceso IPD de la gestión de proyectos constructivos (Pons, 2014).

En la **Figura 5.4** se aprecian las principales diferencias que se encuentran entre la implementación de un modelo de gestión tradicional, comparado con un modelo IPD. Este último, destaca contemplando desde la organización, el trabajo continuo de un equipo integrado conformado por los actores principales de todas las etapas constructivas para la definición completa del proyecto.

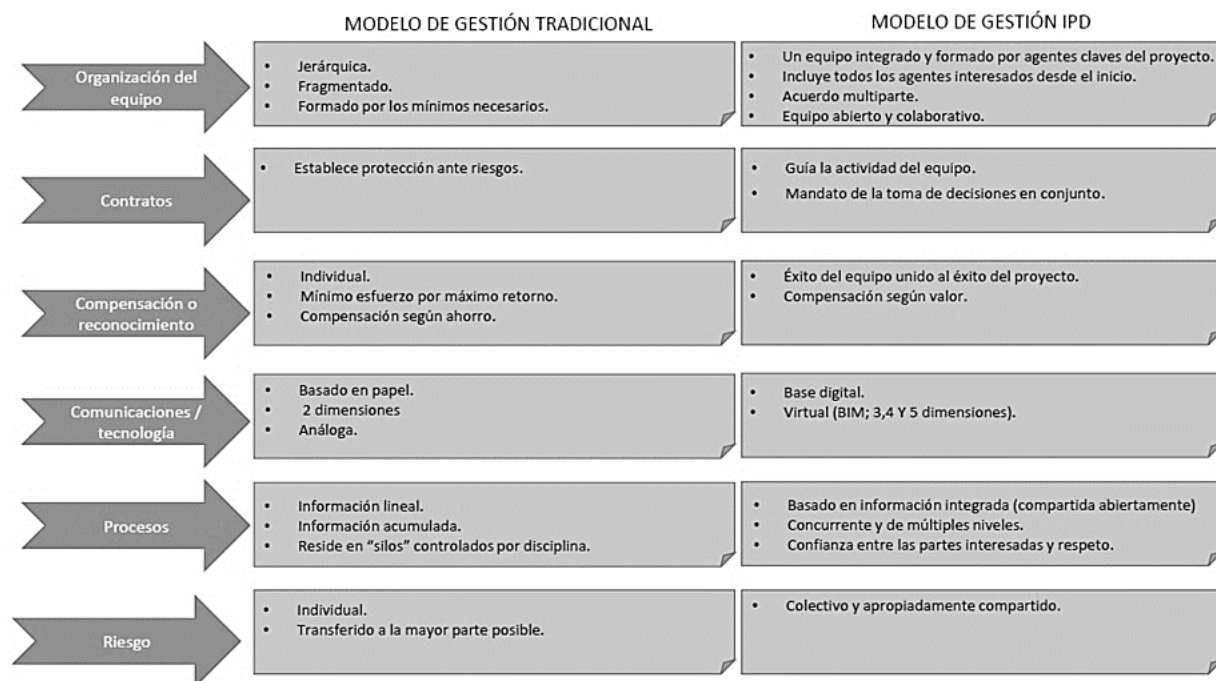


Figura 5.4. Diferencias en el modelo de gestión tradicional contra el modelo IPD (AIA, 2007).

También, abarca la implementación de tecnologías actuales, que permiten el modelado en más dimensiones (Sección 2.2.1) para generar un correcto entendimiento del conjunto de interacciones involucradas dentro del proyecto. Después, contempla una amplia comunicación con una abierta transferencia de información detalla sobre todo el proyecto. Además, maneja todos los posibles riesgos identificados desde la etapa de organización, para ser repartidos entre las múltiples disciplinas encargadas de evitar estos riesgos, generando un entorno totalmente colaborativo.

Una vez establecido un sistema colaborativo como el que promueve IPD, se agrega a este modelo, la utilización de BIM, ya que este ayuda a concentrar la información generada por todos los actores, modificar, actualizar, extraer, insertar, de modo que se vuelve una plataforma que activa la interoperabilidad (Figura 5.5). A través de sus plataformas de modelado virtual como las que puede brindar *Revit*® en varias modalidades, en conjunto con la gestión de documentación como es *BIM 360*® o simulaciones en tiempo real como las que ofrece *Naviswork*®, entre muchas otras.

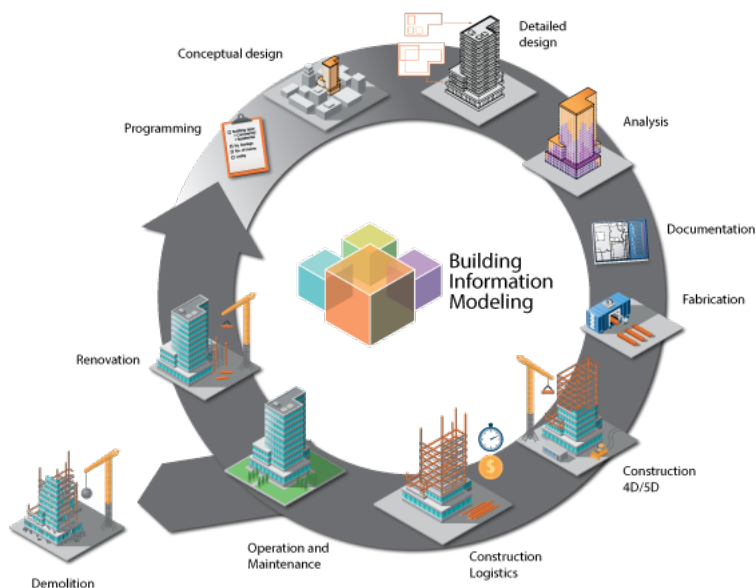


Figura 5.5. Implementación completa de metodologías BIM (Hildebrandt, 2020).

Con la selección de las herramientas BIM a implementar en el proyecto constructivo, se procede a utilizar el esquema propuesto para metodologías BIM-Construcción-*Lean* (Figura 5.1), en cada una de las cuatro etapas de la siguiente manera:

5.2. Etapa de Diseño

Esta comprende desde los trabajos de composición arquitectónica, hasta el desarrollo de todas las ingenierías que intervienen en el proyecto. Este diseño debe cumplir con la normatividad aplicable a la región y a los requerimientos del propietario.

Para lograr la interoperabilidad (*i.e.* capacidad de las herramientas BIM y de los procedimientos, de compartir datos, posibilitar el intercambio de información y conocimiento entre ellos) en esta etapa, se propone brincar de un nivel cero utilizado en el caso de estudio, a BIM nivel tres (Fig. 5.6) por medio de herramientas de *Revit*[®] para modelado de diseño, modelado *MEP*[®] para tuberías, circuitos eléctricos, mecánicos, modelado de estructura y la herramienta IPD que participa en todas las etapas.

En esta etapa, se trabaja en conjunto con el resto de los involucrados y con eso es posible evitar omisiones o cambio de especificaciones por la falta de cruce de información. Es por eso por lo que *Revit*[®] se vuelve una de las herramientas clave, como lo explica Hildebrandt (2020), quien menciona que es un programa de modelado virtual que permite crear diseños basados en objetos inteligentes y tridimensionales, los que están asociados para coordinarse automáticamente ante cualquier cambio introducido.

Asegurar que la visualización en 3D se encuentre bastante detallada, ayuda a evitar cambios de decisión del propietario una vez ejecutado el trabajo, además de la detección de interferencias para previsualizar cualquier problema que podría ocurrir para el paso de instalaciones.

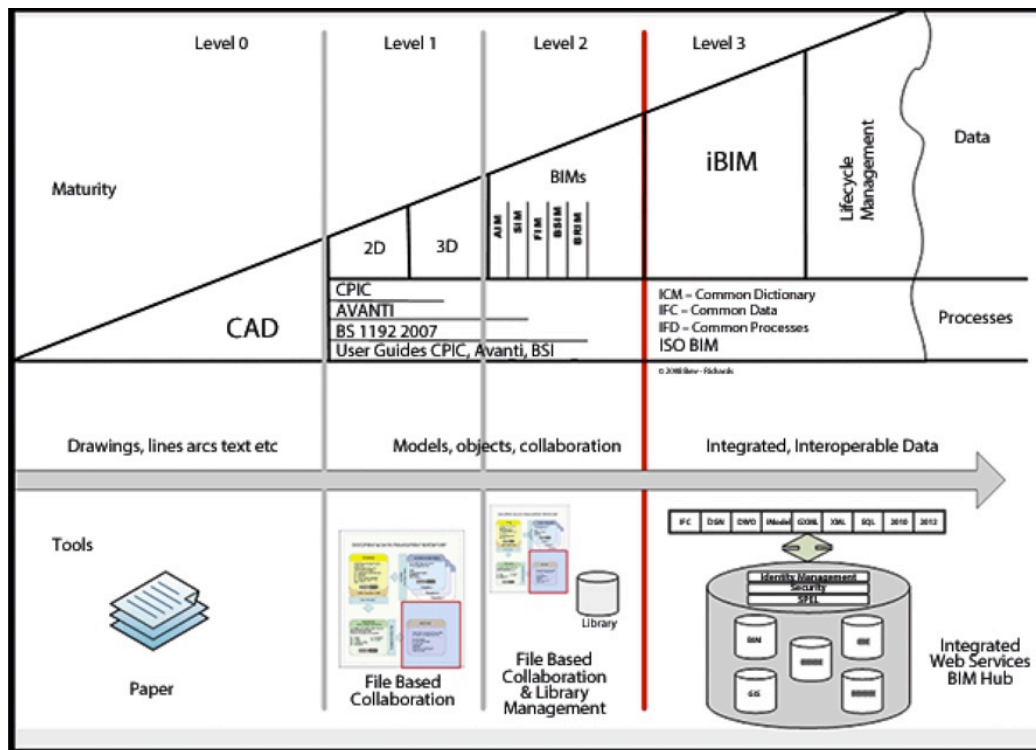


Figura 5.6. Niveles de la implementación de herramientas y metodologías BIM (Barlish and Sullivan, 2012).

5.3. Etapa de preconstrucción

En esta segunda etapa, se evalúan los diseños desde la perspectiva de aquellos que fabricarán e instalarán componentes y llevarán a cabo los trabajos de construcción. Esta evaluación se elabora con la perspectiva de cumplir con objetivos como el de lograr la calidad final deseada, con los requisitos del programa, eliminar riesgos percibidos y lograr una óptima relación calidad-

precio. Se evalúan las decisiones tomadas en la etapa anterior, mediante el análisis de la constructibilidad de la edificación, actividades que implican un estudio detallado de lo siguiente:

- a) La secuencia de actividades que se llevarán a cabo dentro y fuera del sitio, teniendo en cuenta el estado del edificio y su entorno resistente a la intemperie en cualquier momento.
- b) Criterios dimensionales, establecimiento y asignaciones de espacio.
- c) Uso de planta y equipo para ahorrar mano de obra y tiempo y evitar posibles daños.
- d) Practicidad, flexibilidad y tolerancias.
- e) Opciones de estandarización de componentes y procesos.
- f) Reducción de la complejidad para acortar las curvas de aprendizaje.
- g) Identificación de proveedores apropiados.
- h) Oportunidades de prefabricación.
- i) Empaquetar las obras y la asignación de alcance en relación con el comercio y los contratos especializados.
- j) Facilidad y orden de conexiones de interfaz y pilares.
- k) Arreglos de acceso de instalación y mantenimiento incluyendo reemplazo a largo plazo.
- l) Salud y seguridad.
- m) Trabajos temporales como apoyos, retención de fachadas, instalaciones de retención y soporte de zanjas, soportes de grúas, encofrados, encofrados y andamios, incluidos pórticos.
- n) Susceptibilidad a daños y procedimientos de protección en tránsito e in situ.
- o) Requisitos de peso y levantamiento.
- p) Operaciones de descarga.
- q) Almacenamiento y gestión de residuos.

Definiendo a la constructibilidad como la técnica de gestión de proyectos que integra los aspectos técnicos, administrativos y prácticos para revisar el proyecto o la obra, de principio a fin, antes de ejecutarla y que por medio de la tridimensionalidad virtual es posible evaluar y previsualizar cada paso, de cada área, de manera individual y simultáneamente, evolucionando con esto, la perspectiva de esta industria. Esta etapa, disminuye la incertidumbre de todas las etapas constructivas.

En ese sentido, el uso de *Revit*[®], ayuda a conocer a fondo la construcción a partir de modelos de diseño tridimensional. Al dividir y manipular una gran cantidad de elementos, detallados de muros, elementos estructurales de concreto y desarrolla la generación automatizada de dibujos de taller para fabricación detallada de elementos. Hace posible el cumplimiento de los requisitos de los equipos de construcción, con modelos del diseño con los detalles necesarios para cumplirlos. Con total compatibilidad, en coordinación de *Navisworks*[®] directamente en *Revit*[®] para coordinar el diseño junto con el trabajo de equipos que usan software diferente. Además, permite la manipulación total de archivos *AutoCAD*[®] de *Revit*[®] y prepara conjuntos de láminas para exportar y ser compartidas directamente con fabricantes, subcontratistas u otras partes interesadas del proyecto en una gran variedad de formatos disponibles.

Mediante *Naviswork*[®] se puede realizar una comparación entre las diferentes fases del proyecto, por ejemplo, se puede realizar una comparación entre la fase de arquitectura y la fase de instalaciones eléctricas, o la fase de estructura y la fase de arquitectura y de esta forma averiguar dónde colisionan para su posterior corrección. Además, se pueden realizar diferentes filtros de comparación que hace más fácil una detección más localizada. Permite a los usuarios abrir y combinar los modelos 3D, navegar por ellos en tiempo real y revisar el modelo utilizando un conjunto de herramientas que incluye comentarios, *redlining*, punto de vista, y mediciones.

Una amplia posibilidad de complementos o *plugins* de mejora en el paquete añadiendo detección de interferencias, simulación de tiempo 4D, renderizado foto realístico, entre otras herramientas interesantes.

5.4. Etapa de planeación

A diferencia de la gestión tradicional de proyectos donde la planificación está basada en la ejecución y control en un orden jerárquico, es decir, regularmente quien define los tiempos de ejecución es una persona desde escritorio y mediante información teórica, LPS faculta a quienes ejecutarán los trabajos el definir los tiempos reales mediante un plan de trabajo realizado en conjunto con el resto de los involucrados (Fig. 5.7). Entendiéndose con esto como un mecanismo de transformación de “lo que debería hacerse” en “lo que se puede hacer”, con compromisos semanales que garanticen su cumplimiento.



Figura 5.7. Modelo general de planificación de un proyecto usando LPS (Ballard, 2000).

En esta etapa también se desarrolla el plan de logística dentro del sitio de construcción, los suministros, áreas de almacén para materiales, pasos y ubicación de maquinaria, áreas seguras para el tránsito peatonal.

5.5. Etapa de ejecución

La cuarta etapa consiste en aquellas actividades que se encuentran directamente relacionadas a la ejecución de un proyecto (Fig. 5.8), las cuales se encuentran dentro de la gestión de este, por parte de dos actores fundamentales (*i.e.* gerente de operaciones y superintendente). Estas actividades se han planificado y estructurado desde las etapas anteriores de la propuesta (*i.e.* 1-3), para lograr generar un aumento considerable en la productividad y evitar interferencias entre operaciones para garantizar la calidad final de un proyecto.

La etapa de ejecución no solo representa realizar las actividades de acuerdo con la programación establecida y cumplir con los alcances establecidos por el propietario, esto requiere de un análisis más profundo, dividido en dos partes que, como se muestra en la Figura 5.8, se propone en una gerencia de operaciones y un superintendente. Donde el primero se encarga de elaborar y ejecutar el análisis de los aspectos de organización de operación y el segundo, diseñar y ejecutar el diseño de los sistemas de producción, es decir, cubrir la parte técnica.

En la Tabla 5.1, se mencionan las responsabilidades que tendrían a cargo cada uno, sin embargo, se mantiene una interacción conjunta en las cinco secciones, que corresponden a seguridad e higiene, control de calidad, construcción, gestión de materiales, documentación de proyecto.

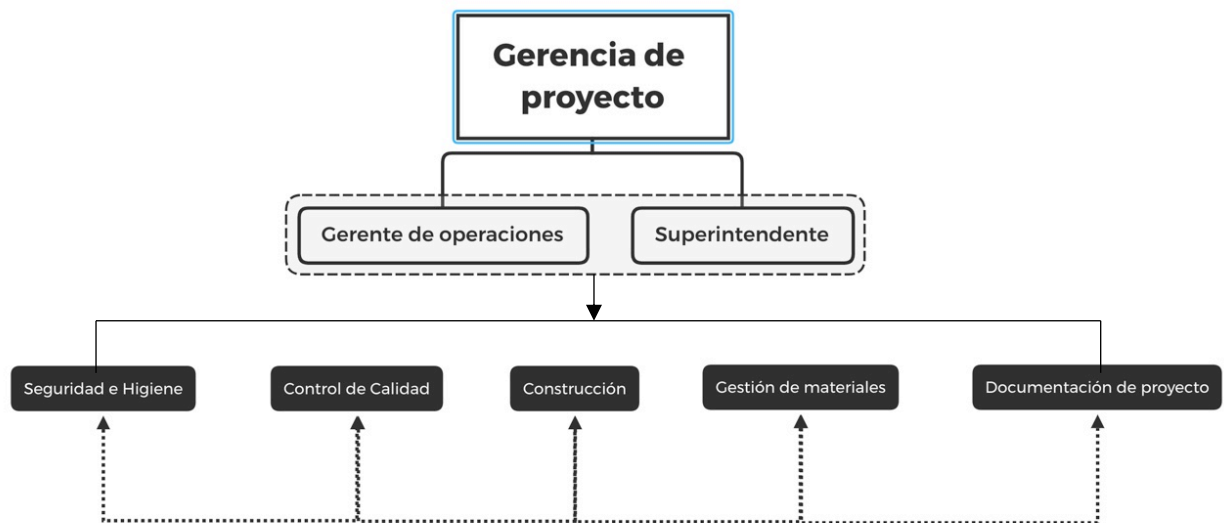


Figura 5.8. Propuesta de gestión de la etapa de ejecución de un proyecto.

Tabla 5.1. Responsabilidades de los encargados de la gerencia del proyecto.

Modelo de ejecución Lean-BIM/ Responsabilidades	
Gerencia de operaciones	Superintendente
Control de costos	Estructura de descomposición de trabajo (EDT) y definición de frentes
Análisis de riesgos y contingencias	Definición de hitos
Gestiones contractuales	Elaboración de tren de actividades por frente:
Suministros	Secuencia de ejecución
Logística	Sectorización
Administración de personal	Dimensionamiento de cuadrillas
Seguridad y medio ambiente	Balanceo de recursos
Temas financieros	Pull planning para unificar los trenes de cada frente
Aseguramiento de control de calidad	
Ingenierías	

5.5.1. Seguridad e Higiene

Se propone el uso de las metodologías de BIM y *Lean* para prevenir y controlar mejor los riesgos laborales. Por medio de BIM es posible visualizar y simular el proceso constructivo, es decir, a través de un modelo en 3D como el que proporcionan algunos software como el caso de *Revit*® y la simulación que te proporciona el 4D a través de plataformas como las que ofrece *Naviswork*®, al permitirte simular los diferentes escenarios que podrían presentarse durante el proceso constructivo, es posible determinar las situaciones de riesgo laboral y con esto elaborar un plan de prevención, es decir, esta vinculación es lo que se conoce como la 8D de BIM (Sección 2.2.1).

Aunado a esto, emplear la herramienta de *Lean 5s*, que de acuerdo con la definición del BPI (2019), “5s” representa palabras japonesas que describen los pasos de un proceso de organización del lugar de trabajo. Las palabras equivalentes en español se muestran entre paréntesis:

1. *Seiri* (Ordenar)
2. *Seiton* (Enderezar, Establecer)
3. *Seiso* (Brillo, Barrido)
4. *Seiketsu* (Estandarizar)
5. *Shitsuke* (Sostener)

En términos simples, la metodología “5s” ayuda a un lugar de trabajo a eliminar elementos que ya no son necesarios (ordenar), organizar los elementos para optimizar la eficiencia y el flujo (enderezar), limpiar el área para identificar más fácilmente los problemas (barrido), implementar el color codificación y etiquetas para mantener la coherencia con otras áreas (estandarizar) y

desarrollar comportamientos que mantengan el lugar de trabajo organizado a largo plazo (sostener).

Implementar la herramienta “5s” ayuda a tener orden y limpieza y con esto disminuir los peligros que podrían ocurrir en un lugar desordenado donde es más probable tener resbalones, caídas, tropiezos, golpes, cortaduras, menos riesgos de contaminación y absorción de sustancias, así como mejorar la salud por estar en sitios más limpios. Sin embargo, esto no es garantía de que se cumplan con los objetivos de seguridad, es por eso por lo que además de aplicar la herramienta “5s” dentro del sitio de construcción, es necesario aplicar las normativas y reglamentos locales en relación con la seguridad e higiene laboral (Montero, 2016). Además, generar de una señalización estandarizada y planificada como base para crear una conciencia en seguridad y asegurar un flujo de trabajo seguro, donde se indiquen las instrucciones de trabajo, se identifiquen los peligros y se etiquete. Si a lo anterior, se le agrega que en la fase de planeación se propuso utilizar la herramienta de LPS y que, al vincularla con el plan de prevención de riesgos, esta aporta la guía para el análisis de restricciones, la protección del flujo de trabajo o el análisis de los fallos de planificación.

5.5.2. Control de Calidad

Para tener un adecuado control de calidad en obra, es necesaria la elaboración de un plan de control de calidad, que contemple todas las etapas constructivas desde un inicio hasta finalizar el proyecto. Este control, debe contemplar todos aquellos parámetros que sean necesarios de establecer para el proceso de control y supervisión global de la obra, cumpliendo con las especificaciones impuestas tanto por normativa como por el cliente.

Se propone la implementación de la técnica *Total Quality Management* (TQM por sus siglas en inglés) basándose en los procesos de manufactura de la metodología *Lean*, para generar un total compromiso a la entrega de la calidad solicitada. Desde la adquisición de los insumos necesarios para la generación de un producto, aplicando un estándar de calidad para cada proceso, con un seguimiento constante de cada etapa de desarrollo hasta garantizar la calidad (LM10, 2017). Esta técnica desarrolla cinco principios fundamentales que pueden ser aplicados totalmente al proceso constructivo de un proyecto. De acuerdo LM10 (2017) estos principios son:

- Producir con calidad, a la primera, al generar una gran optimización de los procesos, reduciendo las pérdidas.
- Enfoque al cliente, donde todos los procesos de producción están especificados según la demanda del cliente.
- Estrategias para mejorar los procesos, adoptando una percepción de las tendencias actuales con la finalidad de continuar innovando la forma de hacer las cosas y manteniéndose competentes con las nuevas exigencias del mercado.
- Mejora continua, aplicando herramientas como *Kaizen*, *5s*, *Total Productive Maintenance* (TPM por sus siglas en inglés) en los procesos internos. Este último, se enfoca en la generación nula de fallas dentro de la cadena de producción.
- Fomento en la participación entre los miembros de la organización, con la creación de mejores condiciones para mantener la motivación de los equipos de trabajo, contemplando sus opiniones y observaciones, generando un proceso de mejora constante.

5.5.3. Construcción

LM10 (2017), establece que la estandarización de trabajos consiste en seleccionar las mejores prácticas, lo que cada operario hace bien o lo que se comprueba que obtiene los mejores resultados para definir una metodología de trabajo, que todos los trabajadores deben seguir. Por ello, se propone esta metodología para operar con trabajos estandarizados y al mismo tiempo sirve de base para encontrar nuevas mejoras. Cada mejora se va incorporando a la metodología, por lo que se obtiene una mejora continua constantemente (*i.e. kaizen*).

De acuerdo con LM10 (2017) la estandarización de trabajos se realiza en base a tres conceptos clave:

- *Takt time*, como el ritmo en que los productos deben entregarse de acuerdo con la demanda.
- Secuencia de tareas, las cuales corresponden aquellas actividades que un operador debe realizar para llevar a cabo un proceso, dentro de un tiempo de ciclo.
- El inventario estándar, contemplando todos los elementos necesarios para generar una producción sin interferencias.

Además, con la manufactura fuera de sitio o prefabricación como un proceso de fabricación y pre-ensamblaje, en el cual, los componentes de construcción se realizan en una ubicación diferente al lugar de ensamblaje final, en instalaciones especializadas con diferentes materiales, lo que puede conducir a un mejor control de la complejidad inherente dentro del proceso de construcción.

5.5.4. Gestión de materiales

Por último, se presenta la necesidad de tener un manejo adecuado de los materiales involucrados en todas las etapas constructivas. Por esto, se propone la técnica JIT ([Sección 2.3](#)), LPS e IPD, puesto que se requiere de la implementación de una gestión detallada que se encargue de estandarizar la adquisición de recursos que se necesitarán solamente para cumplir procesos específicos tanto en tiempo como en forma. Con una planificación rigurosa de las operaciones necesarias para cada proceso constructivo, controlando las cantidades suficientes de materiales para asegurar un manejo óptimo del espacio asignado al inventario.

Además, mediante el continuo flujo de información que nos permite el uso constante y en todas las etapas *BIM 360®*, *IPSUM®* y junto con logística y programación por medio de *Naviswork®*, se asegura no solo el suministro en el tiempo exacto en que se va a utilizar, sino también el evitar pérdidas y desperdicios de estos.

Para finalizar este capítulo, en la [Tabla 5.2](#) se muestra el conjunto de todas las herramientas abordadas en la propuesta de gestión de proyectos con metodologías BIM-Construcción-*Lean*. En esta tabla, se encuentran las cuatro etapas definidas al inicio de este capítulo ([Fig. 5.1](#)), donde se enlistan los conceptos de proyecto abordados para cada una de las herramientas que se proponen, identificándose en dos grupos, BIM y *Lean*, las cuales fueron descritas con mayor detalle en las secciones anteriores (*i.e.* [Secciones 5.4.1-5.5.4](#)).

Tabla 5.2. Resumen de herramientas para propuesta de gestión de proyectos con metodologías BIM-Construcción-*Lean*.

Clave	Diseño			Preconstrucción		
	Conceptos atendidos	Herramientas		Conceptos atendidos	Herramientas	
		BIM	Lean		BIM	Lean
1	Análisis arquitectónico	Revit	IPD	La secuencia de actividades que se llevarán a cabo dentro y fuera del sitio.	BIM 360/ Revit Construcción	IPD
2	Análisis de ingenierías mecánicas	Revit MEP		Criterios dimensionales, establecimiento y asignaciones de espacio.		
3	Análisis estructural	Revit Structure		Uso de planta y equipo para ahorrar mano de obra y tiempo y evitar posibles daños.		
4	Análisis de otras ingenierías	Revit		Practicidad, flexibilidad y tolerancias.		
5	Validación de normativas legales			Opciones de estandarización de componentes y procesos.		
6	Visualización 3D			Reducción de la complejidad para acortar las curvas de aprendizaje.		
7				Identificación de proveedores apropiados.		
8				Oportunidades de prefabricación.		
9				Salud y seguridad.		
10				Trabajos temporales		
11				Almacenamiento y gestión de residuos.		

Clave	Planeación			Construcción				
	Conceptos atendidos	Herramientas		Conceptos atendidos	Herramientas			
		BIM	Lean		BIM	Lean		
1	Estimado de costos	BIM 360/ Naviswork/ Revit/IPSU M	IPD/Last Planner System	Construir los sistema diseñados	BIM 360/ IPSUM/Revit	5"S"/ Prefabricados/ PD/Last Planner System/TQM/ JIT/ Estandarizació /Kaizen/TPM		
2	Análisis del sitio: diseño de operación			Instalación de prefabricados				
3	Análisis de las fases			Ejecutar plan de seguridad e higiene				
4	Programa de obra			Control de calidad				
5	Desarrollo de plan de seguridad e higiene			Gestión de materiales				
6				Documentación de control y planeación				
7								
8								
9								
10								
11								

Capítulo 6 - Conclusiones generales y líneas de investigación futura

6.1. Conclusiones generales

En este caso de estudio se realizó una propuesta de potenciales herramientas implementadas en Construcción-*Lean*-BIM, para evaluar los niveles de contribución en la disminución de desperdicios involucrados en la etapa de construcción. Estas herramientas se presentan como una propuesta de aplicación al edificio vertical habitacional (Sección 4.1) donde se realizaron varias visitas de campo, con la finalidad de apreciar las situaciones innecesarias dentro de un proceso constructivo, al contemplar las metodologías descritas en las Secciones 2.2-2.3.

Se realizó un estado del arte en conjunto con metodologías aplicadas recientemente a edificios similares al caso de estudio, para seleccionarse un total de siete herramientas principales con las que se evaluó su contribución independiente (*i.e.* IPD, LPS, 5s, TQM, *Kaizen*, TPM y JIT), al aplicarse dentro de los parámetros descritos en la Sección 3.2, como en la argumentación detalla de las deficiencias presentadas en el proyecto (Sección 4.5). Además, con el desarrollo del proyecto en conjunto con herramientas BIM, se propuso la posibilidad de utilizar elementos prefabricados como una contribución a los procesos constructivos, al generar múltiples beneficios en su implementación (Sección 2.4.1). Con la aplicación de estas herramientas es posible obtener un porcentaje considerable en la reducción de desperdicios, que se verá reflejado en ahorros de materiales, traducándose directamente en costos, contribuyendo en el camino hacia la construcción sustentable.

6.2. Estado del arte

El estado del arte realizado en el **Capítulo 2**, desarrolló un contexto detallado sobre los cambios que se han implementado en la construcción, así como los avances tecnológicos que permitieron generar técnicas y herramientas para lograr edificaciones a lo largo del tiempo.

Se abordó como la construcción tradicional se ha vuelto un modelo que domina a gran escala, por su facilidad de reproducción y amplia mano de obra disponible en el país, traduciéndose como las razones principales del estancamiento de la construcción por más de 30 años.

Se comprendió que esta construcción se centra en cómo es la forma en que se hacen las cosas, mientras que la Construcción-*Lean*, se enfoca en la búsqueda de como mejorar las formas en que se han hecho las cosas tradicionalmente, al implementar las nuevas metodologías y tecnologías que se tengan al alcance. Sin embargo, lo más complicado de *Lean* es lograr el cambio de mentalidad, de adoptar una cultura de cómo hacer las cosas de una manera mejor, para realizar procesos estructurados. Es un cambio de paradigmas que induce a una constante capacitación en cada uno de los niveles de producción, con la generación de retroalimentaciones para mejorar cada vez más conforme se adoptan mejores practicas constructivas. Por otro lado, se generó el entendimiento de las posibilidades que se encuentran al alcance de constructores, contratistas, arquitectos, ingenieros y dependencias gubernamentales, para el desarrollo de proyectos que contemplen a todos los actores involucrados desde las etapas preliminares de un proyecto constructivo.

Además, este capítulo permitió localizar los aspectos fundamentales para el desarrollo e implementación de metodologías BIM y Construcción-*Lean* en las distintas etapas de un proyecto, donde a mayor interacción de las disciplinas y actores involucrados en este (*i.e.* dimensiones de BIM), se genera un entendimiento completo del mismo, asegurando la calidad proyectada desde un comienzo.

6.3. Herramientas empleadas en el caso de estudio

El análisis realizado en el **Sección 4.5** permitió comprender la gran necesidad e importancia de implementar nuevas metodologías que impulsen el desarrollo sustentable, con la generación de beneficios dentro de las tres principales ramas de la sustentabilidad, que al implementar las metodologías que se abordaron en las **Secciones 2.2-2.3** demuestran el potencial que ambas presentan, tanto de forma independiente, como en las posibles sinergias que se pueden producir en su implementación.

Por otro lado, las normativas mexicanas en cuanto a la gestión de residuos de construcción se encuentran limitadas solamente a la gestión y manejo de los residuos, dejando de lado consideraciones y medidas para minimizar, o en su caso evitar, la generación de estos. Dado que México cuenta con una gran extensión territorial donde se vuelve económico deshacerse de la basura y los residuos especiales, como son los de la construcción: aunado a que existen leyes o normas, pero no organismos regulatorios que vigilen el cumplimiento o apliquen sanciones, se vuelve secundario o sin importancia el procurar minimizar la generación de estos.

Contrario a países como los Estados Unidos de Norteamérica (EUA), donde la disposición de residuos de construcción ronda en los \$2,483.66 MXN/m³, en México el

precio es de \$233.33 MXN/m³. Solo al contemplar que en México el costo por disposición de residuos de construcción por m³ es de aproximadamente el 9% del costo que en EUA, se refleja la deficiencia en la aplicación de instrumentos restrictivos y la falta de interés en optimizar recursos.

Adicional a lo anterior, se debe considerar que dentro de las principales certificaciones internacionales para edificación verde (*e.g.* LEED), solamente se promueve el reciclaje de materiales, más no la reducción de la generación de residuos. Se ha dejado de lado la posibilidad de diseñar proyectos y procesos constructivos que promuevan la optimización de recursos y se disminuyan los impactos ambientales que se encuentren directamente relacionados con estas (*i.e.* explotación excesiva de recursos).

Esto vuelve urgente la modificación de la visión de quienes participan en la industria de la construcción, así como de los organismos de normalización y legislaciones al respecto. Es necesario introducir nuevas metodologías que sean aplicadas tanto a la habitabilidad como a la sustentabilidad, para introducir una mejora constante que contemple la gama de materiales y mecanismos que surgen de la globalización, así como seleccionar propuestas de nuevos mecanismos de edificación. No obstante, el conjunto de las metodologías BIM y Construcción-*Lean*, suponen grandes avances para la industria de la construcción, por lo que se esperaría que, con el paso de los años, los gobiernos, contratistas y clientes, soliciten nuevos proyectos que se encuentren detallados dentro de alguna de estas metodologías, e inclusive los organismos de normalización, aumenten las capacidades de estas, al solicitar un mayor detalle de la aplicación de códigos correspondientes.

Su adopción en diversas partes del mundo continúa incrementando ([Sección 2.2.2](#)), haciéndose cada vez más común el tener al alcance múltiples modelos detallados sobre cada

etapa de un proyecto constructivo, ayudando considerablemente la globalización de la fabricación de subconjuntos de edificios cada vez más complejos, para lograr ser económicamente viables.

Por otro lado, este conjunto de metodologías se encuentran en fase de desarrollo, las cuales, lograrán dividir la construcción entre la forma tradicional de la moderna conforme incrementa su adopción en general, hasta convertir a ésta última en una práctica convencional. De esta manera contribuirán a fomentar la posibilidad de prefabricación en pequeña escala, para que pequeños productores regionales se apropien de sistemas constructivos modulares, aportando directamente a la sustentabilidad.

A la vez, aumentará la flexibilidad y variedad en los métodos y tipos de construcción, con una disminución notable de papeleo, menos errores o prácticamente nulos, menos desperdicio y una mayor productividad. Los proyectos de construcción funcionarán mejor, con la generación de mejores análisis con alta calidad de detalle y disponibles para todos los agentes involucrados. Una exploración de nuevas y menores alternativas, para redefinir técnicas, maquinaria, herramientas y equipo, al optimizar todos los conjuntos de actividades correspondientes a cada etapa de un proyecto.

Minimizando considerablemente las inconformidades del cliente, al lograr apreciar cualquier tipo de modificación desde la etapa de diseño, o en pleno proceso constructivo, con las herramientas BIM, sin la necesidad de esperar hasta que estas se encuentren realizadas físicamente y detallando las implicaciones o contribuciones que se adquieren al momento de ejecutarlas.

Se presentarán reducciones considerables tanto de los costos como de los residuos implicados en el proyecto. Al tener la posibilidad de generar todas las corridas de datos en un solo modelo, con cualquier movimiento o alteración del diseño, materiales, dimensionado,

entre otros, se apreciará el incremento o decremento de los costos para cada sección o etapa en específico. Con una mejor gestión de obra en conjunto con la metodología *Lean*, tanto en tiempos y organización, como en materiales, se podrán reducir los desperdicios considerablemente y con porcentajes adicionales gracias a la adopción de buenas prácticas de todos los trabajadores.

Por último, todas las contribuciones mencionadas facilitarán las cuestiones técnicas y los detalles de acuerdo con códigos estructurales junto con estándares en sustentabilidad, con el constante desarrollo de comprobaciones automáticas para la conformidad del código y la capacidad de construcción con la utilización de herramientas BIM adicionadas con herramientas *Lean*. Al simular las distintas circunstancias relacionadas con iluminación, ventilación, uso de energías y eficiencia energética, se logrará optar por edificaciones de mayor calidad, aumentando el confort de cada uno de los espacios del proyecto.

6.4. Impactos y beneficios ambientales

Con el análisis del caso de estudio realizado en el [Capítulo 4](#), junto con la adaptación de propuestas y herramientas para optimizar la gestión de la construcción en el [Capítulo 5](#), se evidenció la problemática completa de dicho caso, en donde se presentaron fuertes sobrecostos generados por realizar una gestión de construcción tradicional, reflejada en el aumento del presupuesto final, lo que conduce a una disminución directa de la utilidad (la utilidad fue del 6% del total del presupuesto, quedando solo un 3% restante).

El costo final, al considerar los 21 millones adicionales por retrabajos, ascendió a los \$386'484,862.43 MXN para el proyecto de 38,598 m² de construcción, por lo que el costo aproximado por m² construido, sin contemplar los retrabajos, ronda por los \$10,000.00 MXN (*i.e.* \$386'484,862.43/38,598 m²). Si se realizara una estimación de los m² que pudieron

haberse construido con el monto adicional de los retrabajos (*i.e.* 21 millones MXN) se habría logrado edificar más de 2,000 m² de construcción para otro desarrollo similar, al aplicar la propuesta de gestión planteada en esta investigación (Capítulo 5).

Dichos retrabajos, fueron necesarios para cumplir con los objetivos y la calidad prevista para el proyecto de edificación vertical. De acuerdo con la información proporcionada por el desarrollador y de acuerdo con la información mencionada en la sección 4.5.1., los costos por retrabajos representaron un 33% del monto total de gastos adicionales, es decir, el 33% de \$21'362,315.84 MXN. Si tomamos en cuenta el precio por metro cuadrado de construcción de este proyecto, estos retrabajos representan el equivalente a aproximadamente 700 m² de construcción adicional, es decir, un impacto ambiental de 350 TON de CO₂ (considerando que 1 m² de construcción genera aproximadamente 0.5 TON de CO₂).

Además, se conoce que en la ZMG se encontraban activos 130 proyectos con características similares en el presente año, que pudieron haberse gestionado de la misma manera tradicional, por lo que al suponer que podría replicarse el proyecto de este caso de estudio en este mismo número de proyectos activos, podría extrapolarse una cantidad de retrabajos equivalentes a aproximadamente 91,000 m², es decir, los impactos ambientales y económicos que la construcción de dichos metros cuadrados implican.

En cuestión de la generación de residuos, de los 29,127.00 m³ que se generaron en la edificación del proyecto del caso de estudio, el 33% fueron residuos de retrabajos (*i.e.* 8,700 m³ de residuos extras por retrabajos), por lo que, al replicar el ejercicio anterior con los 130 proyectos activos, se podría extrapolar una cantidad de residuos de aproximadamente 1'249,550 m³ que representa una cantidad equivalente al agua de 370 albercas olímpicas.

Sin embargo, al implementar la propuesta planteada en esta investigación, es posible evitar todos los retrabajos y la generación de residuos generados por los mismos, junto con la posibilidad de minimizar considerablemente la generación de residuos implicados en la construcción, al utilizar las herramientas de esta investigación.

En la parte social, las condiciones de los trabajadores carecían de medidas de seguridad, tanto para el cuidado de la salud como la forma en que se realizaban trabajos físicos, realizándose actividades pesadas únicamente de forma manual. Sin equipo o protecciones para el polvo, ojos, manos, cabeza y sin indicaciones de seguridad, se presentan riesgos considerables en la salud y el desempeño laboral. Por otro lado, al optar por la gestión de la propuesta de esta investigación, se pueden mejorar las condiciones de salud de los trabajadores al tener un ambiente seguro de trabajo, limpio y organizado, minimizando los riesgos de comprometer la salud y el bienestar de los trabajadores.

6.5. Líneas de investigación futura

En concordancia con las conclusiones descritas en la sección anterior junto con los conocimientos adquiridos a lo largo del TOG, se proponen las siguientes líneas de investigación futura.

- Modelado completo del edificio del caso de estudio, posterior a su etapa de diseño, para considerar todas las herramientas mencionadas en la [Sección 5.1](#) y evaluar los porcentajes reales que pudieran presentarse en el proyecto.
- Modelado completo del mismo edificio, con la aplicación de distintas herramientas para obtener las contribuciones reales de cada una de estas.

- Estudio de la reducción en las emisiones de CO₂ por la aplicación de las herramientas implementadas en este caso de estudio.
- Elaboración del modelado de propuestas de elemento prefabricados que pudieron haberse aplicado en las etapas de construcción y contrastar los ahorros económicos y en tiempos de trabajo.
- Elaboración de manuales de transición 2D a BIM, enfocados a trabajadores de la construcción (*i.e.* mano de obra tradicional).
- Aplicación de metodologías BIM de acuerdo con la normativa mexicana.

Referencias

- AIA. (2007). “*Integrated Project Delivery: A Guide*”. The American Institute of Architects.
- Allen, B. (2016) “*The future of bim will not be bim, and it’s coming faster than you think!*”. Autodesk University.
- Andrés, S., de-la-Peña, A., del-Solar, P. and Vivas, M.D. (2017). “*Implementation of BIM in Spanish construction industry*”. Building & Management. 1(1), 01-08. doi: 10.20868/bma.2017.1.3519
- Ansah, R. H., Sorooshian, S. and Mustafa S.B. (2015). “*Lean construction: An effective approach for project management*”. Journal of Engineering and Applied Sciences VOL. 11, NO. 3, FEBRUARY 2016. ISSN 1819-6608.
- Aziz, R. F., & Hafez, S. M. (2013). “*Applying lean thinking in construction and performance improvement*”. Alexandria Engineering Journal, 52(4), 679–695. doi:10.1016/j.aej.2013.04.008
- Ballard, G. (2000). “*The last planner system of production control*”. Tesis doctoral. Faculty of Engineering, The University of Birmingham.
- Barlish, K. & Sullivan, K. (2012). “*How to measure the benefits of BIM -A case study approach*”. Automation in Construction, 24, pp.149–159.
- Bogue, R. H. (1927). “*A Digest of Literature on the Constitution of Portland Cement Clinker*”, PCA Fellowship Paper 3, NBS, Feb.1927.
- BPI. (2019). “*What does 5S stand for?*”. Bussines Performance Improvement. <http://leansixsigmadefinition.com/glossary/5s/>(último acceso el 18/05/2020).

- Campero M., Alarcón L.F. (2008). “*El Sistema de Planificación y Control de producción: El Último Planificador*”. Capítulo XIV del libro Administración de Proyectos Civiles, 3ª Edición.
- CMIC. (2013). “*Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición*”. <http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Flayer/PM RCD Completo.pdf> (último acceso el 18/05/2020).
- Crespi, G. (2019). “*BIM: Building Information Modelling*”. https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/capacitacion/20190318/Sesion_4_Building_Information_Modelling.pdf (último acceso el 18/05/2020).
- Dalton, J. (2019). “*Great Big Agile*”. doi:10.1007/978-1-4842-4206-3
- DDA (2020). “*Prefabrication and Modular Construction 2020*”. Dodge Data & Analytics. Smart Market Report.
- De Carvalho, A., Granja, A., & da Silva, V. (2017). “*A Systematic Literature Review on Integrative Lean and Sustainability Synergies over a Building's Lifecycle*”. Sustainability, 9(7), 1156. doi:10.3390/su9071156
- Diekmann, E., Krewedl, M., Balonick, J., Stewart, T. and Won, S. (2004) “*Application of lean manufacturing principles to construction*”. A Report to The Construction Industry Institute The University of Texas at Austin.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K. (2008). “*BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*”. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-18528-5.
- EDM. (2018). “*Mayores construcciones de la Antigüedad y metodología que utilizaban*”. Escuela de Diseño de Madrid. <https://esdimma.com/mayores->

- [construcciones-de-la-antigüedad-y-metodologia-que-utilizaban/](#) (último acceso el 18/07/2019).
- Gao, S., & Low, S. P. (2014). “*The Last Planner System in China’s construction industry - A SWOT analysis on implementation*”. International Journal of Project Management, 32(7), 1260–1272. doi:10.1016/j.ijproman.2014.01.002
- Green, S. D., & May, S. C. (2005). “*Lean construction: arenas of enactment, models of diffusion and the meaning of leanness.*” Building Research & Information, 33(6), 498–511. doi:10.1080/09613210500285106
- Hardin B. and McCool D. (2015). “*Bim and Construction Management*”. John Wiley & Sons. 2da. ed. ISBN: 978-1-118-94276-5.
- Hildebrandt. (2020) “*Unir, generar y analizar información con bim*”.
<http://www.hildebrandt.cl/unir-generar-y-analizar-informacion-con-bim/> (último acceso el 18/05/2020).
- IIEG. (2018). “*Población en Jalisco 2018*”. Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco. <https://iieg.gob.mx/strategos/portfolio/poblacion-en-jalisco-2018/> (último acceso el 18/05/2020).
- INEGI (s.f.). “*Población, cuéntame de México*”. Instituto Nacional de Estadística y Geográfica. <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/default.aspx?tema=P> (último acceso el 18/05/2020).
- IPCC. (2014). “*Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*”. Contribution of working group III to the fifth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change 9. Building. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. United Kingdom and New York, USA.

- Johansen, E., & Walter, L. (2007). “*Lean construction: Prospects for the German construction industry*”. *Lean Construction Journal*, 3(1), 19-32.
- Kivilcim C. and McAlister, C. (2008). “*A model for integrating generations: young surveyors working group*”. International Federation of Surveyors. July 2008.
- KOI. (2020). Torre KOI. <http://www.koi.mx/> (último acceso el 18/05/2020).
- Koskela, L. (1992). “*Application of the new production philosophy to construction*”. Stanford University.
- Krygiel E. and Nies, B. (2008). “*Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling*”. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-23960-5.
- Latiffi, A. A., Brahim, J., & Fathi, M. S. (2014). The Development of Building Information Modeling (BIM) Definition. *Applied Mechanics and Materials*, 567, 625–630. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.567.625
- Lean Construction Institute. (2017). “*What is Lean Design & Construction*”. Lean Construction Institute. Recuperada en mayo 18, 2019, de <https://www.leanconstruction.org/about-us/what-is-lean-design-construction/>
- Lean IPD. (2019). “*Lean and Integrated Project Delivery*”. <https://leanipd.com/> (último acceso el 12/06/2020).
- Leandro Hernández, A. G. (2008). “*Mejoramiento de los procesos constructivos*”. *Tecnología En Marcha*, 21(4), 64–68.
- Leite, F. L. (2019). “*BIM for Design Coordination: A Virtual Design and Construction Guide for Designers, General Contractors, and MEP Subcontractors*”. John Wiley & Sons. ISBN 9781119516033.

- LM10 (2017) “*Metodología Lean Manufacturing: Qué es y cómo implementarla en tu empresa*” Lean Manufacturing 10. <https://leanmanufacturing10.com/> (último acceso el 12/08/2019).
- López Flores, L. E. (2018). “*Análisis y evolución de los sistemas constructivos prefabricados, impacto ambiental e interacción con el sistema constructivo tradicional mexicano*”. *Anales de Edificación*, 4(3), 44–51.
doi:10.20868/ade.2018.3799
- López, P. (2018b). “*El crecimiento poblacional de México, problema grave*”.
<http://www.gaceta.unam.mx/el-crecimiento-poblacional-de-mexico-problema-grave/> (último acceso el 12/08/2019).
- Martínez, P., González, V. and Fonseca, E. (2009). “*Integración conceptual Green-Lean en el diseño, planificación y construcción de proyectos*”. *Revista ingeniería de construcción*, 24(1), 05-32. doi:10.4067/S0718-50732009000100001
- Mascareña, P. (2005). “*Actúa: Guía para una vida sostenible*”. <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/gu-a-de-consumo-act-a.pdf> (último acceso el 12/08/2019).
- McGraw-Hill Construction (2010). “*How building information modeling is contributing to green design and construction*”. Smart MarketReport.
- McGraw-Hill Construction (2012). “*The business value of BIM in North America. Multiyear trend analysis and user ratings (2007-2012)*”. Smart MarketReport.
- Melo, A. (2019). “*Metodología BIM: Tendencias tecnológicas en las vías terrestres*”. Conferencia del Congreso de Tendencias Tecnológicas en las Vías Terrestres (TTVT), Hidalgo, México.

- Monjo, J. (2005). “*La evolución de los sistemas constructivos en La edificación. Procedimientos para su Industrialización*” Informes de la Construcción 57(499-500), 37-54. doi:10.3989/ic.2005.v57.i499-500.481
- Montero Martínez, Ricardo. (2016). “*Relación entre el Lean Manufacturing y la seguridad y salud ocupacional*”. Salud de los Trabajadores, 24(2), 133-138.
- Paez, O., Dewees, J., Genaidy, A., Tuncel, S., Karwowski, W., & Zurada, J. (2004). “*The lean manufacturing enterprise: An emerging sociotechnological system integration*”. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, 14(3), 285–306. doi:10.1002/hfm.10067
- Partida, V. (2008). “*Proyecciones de los hogares y las viviendas de México y de las entidades federativas, 2005-2050*”. Consejo Nacional de Población. México.
- Penttilä, H. 2007, “Early Architectural Design and BIM”. Computer-aided architectural design futures conference; CAAD Futures 2007, pp. 291-302, Sydney.
- Piercy, N., & Rich, N. (2015). “*The relationship between lean operations and sustainable operations*”. International Journal of Operations & Production Management, 35(2), 282–315. doi:10.1108/ijopm-03-2014-0143
- Pons Achell, J. F. and Rubio Pérez I. (2019). “*Lean construcción y la planificación colaborativa metodología del Last Planner System*”. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España. ISBN: 978-84-09-10609-7.
- Pons, J. P. (2014). “*Introducción a Lean Construction*”. Fundación Laboral de la Construcción. ISBN: M-6849-2014
- Ramírez, D. G. (2018). “*Aplicación de BIM (Building Information Modeling) en la formulación de proyectos inmobiliarios*”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Rojas López, M., Henao Grajales, M. y Valencia Corrales, M. (2016). “*Lean Construction-LC bajo pensamiento Lean*”. Ingenierías Universidad de Medellín, 16, (30), 115-128. doi: 10.22395/rium.v16n30a6.
- Sachs, I. “*Ecodesarrollo: concepto, aplicación, beneficios y riesgos*”. Agricultura y Sociedad. 18(1981), 9-32.
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., & Owen, R. (2010). “*Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction*”. Journal of Construction Engineering and Management, 136(9), 968–980. doi:10.1061/(asce)co.1943-7862.0000203.
- Saieg, P., Sotelino, E. D., Nascimento, D., & Caiado, R. G. G. (2018). “*Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review*”. Journal of Cleaner Production, 174, 788–806. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.030
- Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., & Minkarah, I. (2006). “*Lean Construction: From Theory to Implementation*”. Journal of Management in Engineering, 22(4), 168–175. doi:10.1061/(asce)0742-597x(2006)22:4(168)
- Salgin, B, Arroyo, P, & Ballard, G. (2016). “*Explorando la relación entre los métodos de diseño lean y la reducción de residuos de construcción y demolición: tres estudios de caso de proyectos hospitalarios en California*”. Revista ingeniería de construcción, 31(3), 191-200. doi: 10.4067/S0718-50732016000300005
- Santos, A. (1999). “*Application of Flow Principles in the Production Management of Construction Sites*”. Tesis doctoral. School of Construction and Property Management, University of Salford, England.

- Scarpellini, A. A., Zabalza, I., and Días, S. (2014). "*Impacto de los materiales de construcción, análisis de ciclo de vida*". Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos. *Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza*.
- Sdegno, A. (2017). "*For an Archeology of the Digital Iconography*". Proceedings. 1(9), 1093. doi:10.3390/proceedings1091093.
- SEMARNAT. (2014). "*Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generados por las actividades de construcción en México*". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Smith, D. (2007). "*An Introduction to Building Information Modeling (BIM)*" Journal of Building Information Modeling.14, 12–4.
- Stutzman, P. (2001). "*Contributions of NIST/NBS researchers to the crystallography of construction materials*". Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 106(6), 1051. doi:10.6028/jres.106.056.
- UNEP-SBCI. (2006). "Submission of the United Nations Environment Programme (UNEP) Sustainable Building Initiative (SBCI) to the Ad Hoc Working Group on Long-Term Cooperative Action under the Convention (AWG-LCA)".
- Womack, J., Jones, D. and Roos, D. (1996). "*The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production-Toyota's Secret Weapon in the Global Car Wars That Is Now Revolutionizing World Industry*". Simon and Schuster. ISBN: 1416554521.
- WorldGBC. (2019). "*Global Status Report for Buildings and Constructio: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector*".
- Wünsch, T., Neves, E. y Brasil, L. (2017). "*BIM and Lean Construction: The Evolution Obstacle in the Brazilian Civil Construction Industry*". Engineering, Technology & Applied Science Research, (7, No.5), pp.1904-1908.