



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **La iteración como herramienta de gestión y planificación en el diseño de ejecución en proyectos de construcción**

**Edison Aldemar Hincapié Atehortúa**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Arquitectura – Escuela de Construcción  
Medellín, Colombia  
2022



# **La iteración como herramienta de gestión y planificación en el diseño de ejecución en proyectos de construcción**

**Edison Aldemar Hincapié Atehortúa**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Construcción**

Director:

Ing. Civil Ary Alain Hoyos Montilla PhD Ingeniería

Línea de Investigación:

Gestión de la construcción, innovación y desarrollo empresarial

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Arquitectura – Escuela de Construcción  
Medellín, Colombia  
2022



*Dedicado a Dios por darme la vida,  
al Médico Mauricio A. Usme Arango  
por devolvérmela en tiempos de covid,  
y a mi familia por mantener encendida la  
llama de la esperanza.*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la normatividad nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



**Edison Aldemar Hincapié Atehortúa**

Fecha 07/10/2022

# Agradecimientos

A mis padres y hermanos que siempre me han brindado una voz de aliento en todos los caminos que he emprendido.

A mi director y colega Ary Hoyos M. por su paciencia y aportes en el desarrollo de esta investigación.

A la Escuela de Construcción por aportar y permitir mi crecimiento profesional.

A mis amigos y colegas de la academia, en especial los de la IU Colegio Mayor de Antioquia por su apoyo en los momentos difíciles que nos depara la vida.



## Productos académicos

Beneficiario de beca de auxiliar docente de posgrado de la Facultad de Arquitectura para el periodo 2021-2S

### **Participación en congresos:**

Hincapié Atehortúa, Edison A., Hoyos Montilla, Ary A. “Herramientas de gestión y planificación en el diseño de ejecución en la industria de la construcción” *I congreso internacional de las ciencias empresariales y afines 2022 en el tópico gestión y organizaciones*, 15 al 17 de junio, San José de Cúcuta, Colombia (Ponente trabajo).



## Resumen

### **La iteración como herramienta de gestión y planificación en el diseño de ejecución en proyectos de construcción.**

La industria de la construcción es un importante actor en la economía global con \$10 billones de dólares gastados en bienes y servicios cada año, empleando aproximadamente el 7% de la población mundial en edad de trabajar, pero con un índice de productividad por debajo del promedio de la economía global, debido a un problema recurrente de retrasos en la entrega de los proyectos y sobrecostos.

El objetivo de este trabajo fue identificar y categorizar las herramientas de gestión de proyectos, empleadas para la planeación de los mismos, con el fin de establecer parámetros de desarrollo de una herramienta informática que permita optimizar las iteraciones necesarias en el diseño de ejecución. La iteración es un aspecto inherente en cualquier proyecto de diseño, que se da en ciclos no definidos hasta que se completa el proceso. Si las iteraciones no se anticipan y se planifican de manera adecuada, el reproceso y el rediseño pueden ocurrir al azar, resultando en una sobrecarga de tiempo y costos. Y no permite el aprovechamiento del conocimiento adquirido en el ensayo y error como acciones preventivas en los posteriores proyectos, perdiéndose así el conocimiento adquirido, característica muy propia en la fase de construcción de los proyectos.

Esta investigación tuvo una base cualitativa en tres etapas: búsqueda de la literatura, análisis de la literatura, síntesis y discusión de los hallazgos con estudios realizados entre 2001 y 2022.

Inicialmente, se identificaron las metodologías y métodos empleados para el diseño de ejecución o simulación de la construcción a partir de las herramientas de gestión y planificación que se emplean en la industria. Los resultados proporcionan una base para interpretar y evaluar los enfoques, metodologías y métodos que pueden incidir en la conformación idónea de los equipos de trabajo, en la mejora del diseño de ejecución y conducir a un mejor desempeño del proyecto.

Posteriormente, se realizaron análisis bibliométricos y de contenido de 103 estudios de investigación relacionados con simulación de la construcción en los últimos 20 años, donde se presentaron métricas sobre publicaciones, revistas, autores y se categorizaron las metodologías, métodos y herramientas empleadas en la industria, lo cual permitió identificar que la mayor parte de los estudios (22,3%) han sido implementados en la fase de pre-construcción en la *mejora del diseño para un mejor funcionamiento*, lo que indica la importancia del diseño de ejecución desde las etapas preliminares del proyecto.

Finalmente, se establecieron parámetros como: secuencia de actividades, relación de dependencia entre actividades, criterios de aceptación de los cronogramas y duración final, para desarrollar una herramienta informática que permita realizar modelos iterativos predictivos para optimizar la simulación de la construcción o diseño de ejecución desde la fase de diseño del proyecto y durante la materialización del mismo.

**Palabras clave:** diseño de ejecución, diseño iterativo, simulación de la construcción, proyectos de construcción, métodos de gestión.

## **Abstract**

### **Iteration as a management and planning tool in construction project execution design.**

The construction industry is a major player in the global economy, with \$10 trillion spent on goods and services each year, employing approximately 7% of the world's working-age population, and with a productivity rate below the average for the global economy due to a recurring problem of project delivery delays and cost overruns.

The objective of this work was to identify and categorize the project management tools used for project planning and to establish parameters for the development of software to optimize the necessary iterations in the execution design. Iteration is an inherent aspect of any design project that occurs in undefined cycles until the process is completed. If the iterations have not been anticipated and planned, rework and redesign can happen randomly, resulting in time and cost overruns.

This research conducted a qualitative review in three stages: literature search, literature analysis, synthesis, and discussion of findings with studies conducted between 2001 and 2022.

First, the systematic literature review identified the methodologies and methods used for the design execution or simulation of construction in the management and planning tools used in the industry. The results provide a basis for interpreting and evaluating the approaches, methodologies, and tools that can have an impact on the ideal configuration of the work teams, on the improvement of the execution design, and on the overall project performance.

Following that, I performed a bibliometric and content analysis of 103 construction simulation research studies published in the last 20 years, in which metrics on publications, journals, authors, and industry tools were categorized, allowing identification that the majority of the studies (22.3%) had been implemented in the pre-construction phase to improve the design for better performance, indicating the importance of execution design from the preliminary stages of the project.

Finally, parameters were established, such as the sequence of activities, the relation of dependence between activities, the evaluation criteria of the schedules, and the final duration, in order to develop a computer tool that allows the development of predictive iterative models to optimize the simulation of the construction or execution design from the previous phases of the project's design and during its materialization.

**Keywords: implementation design; iterative design; construction simulation; construction projects; management practices.**

## Abreviaturas

<b>ABM</b>	Modelado Basado en Agentes
<b>BIM</b>	Building Information Modeling
<b>CII</b>	Construction Industry Institute
<b>CPM</b>	Critical Path Method (método de la ruta crítica)
<b>DCMA</b>	Defense Contract Management Agency
<b>DES</b>	Simulación de eventos discretos
<b>DMM</b>	Dominio mapeo matriz
<b>DSM</b>	Matriz de estructura de dependencia
<b>EDT</b>	Estructura de Desglose del Trabajo
<b>FF</b>	Fin - fin (Finish-Finish)
<b>FS</b>	Fin - comienzo (Finish-Start)
<b>GA</b>	Algoritmos genéticos
<b>IA</b>	Inteligencia Artificial
<b>LPS</b>	Last Planner System
<b>MDM</b>	Matriz de dominio múltiple
<b>MIT</b>	Instituto de Tecnología de Massachusetts
<b>PAC</b>	Porcentaje de actividades cumplidas
<b>PERT</b>	Program Evaluation and Review Techniques (técnica de revisión y evaluación de programas)
<b>PMI</b>	Project Management Institute
<b>RACI</b>	Responsible Accountable Consulted Informed matrix
<b>RSL</b>	Revisión sistemática de la literatura
<b>SCPMS</b>	Smart Critical Path Method System
<b>SD</b>	Dinámica de sistemas
<b>SDLC</b>	Ciclo de vida de desarrollo de sistemas (por sus siglas en inglés)
<b>SED</b>	Simulación de eventos discretos
<b>SF</b>	Comienzo - fin (Start - Finish)
<b>SS</b>	Comienzo - comienzo (Start-Start)
<b>TI</b>	Tecnología de la información
<b>WIP</b>	Work-In-Process

# Contenido

Pág.

<b>Resumen .....</b>	<b>XI</b>
<b>Abreviaturas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>21</b>
<b>Justificación .....</b>	<b>24</b>
<b>1. Planteamiento de la investigación .....</b>	<b>26</b>
1.1 Problema de investigación .....	26
1.2 Objetivo general .....	29
1.3 Objetivos específicos .....	29
1.4 Metodología de la investigación .....	30
<b>2. Marco teórico conceptual .....</b>	<b>37</b>
2.1. Iteración y su aplicación en la industria de la construcción. ....	37
2.2. Importancia del diseño de ejecución en la construcción .....	38
2.3. El diseño de ejecución y su función en proyectos de construcción .....	42
2.4. Estado del arte .....	44
<b>3. Enfoque, metodología y método en la gestión de proyectos de construcción .....</b>	<b>48</b>
3.1. Enfoques de gestión de proyectos .....	49
3.1.1. Enfoque tradicional .....	49
3.1.2. Enfoque ágil .....	51
3.1.3. Enfoque híbrido .....	53
3.2. Metodologías para la gestión de proyectos .....	55
3.2.1. Metodologías y métodos del enfoque tradicional .....	55
3.2.2. Metodologías y métodos del enfoque Ágil .....	60
3.2.3. Metodologías y métodos del enfoque híbrido .....	63
3.2.4. Metodologías y métodos de Tecnología de Información .....	71
3.3. Discusión .....	75
<b>4. Categorización de las herramientas en función de la eficiencia en los sistemas de gestión de diseño y diseño de ejecución. ....</b>	<b>81</b>
4.1. Búsqueda de la literatura .....	81
4.2. Análisis de literatura .....	82
4.3. Revisión Sistemática de la Literatura .....	86
4.3.1. Fase de pre-construcción .....	87
4.3.2. Fase de construcción .....	89
4.4. Discusión y hallazgos .....	91
<b>5. Variables para el desarrollo de herramientas iterativas de gestión y planificación del diseño de ejecución. ....</b>	<b>93</b>



---

5.1.	Secuencia de actividades y dependencia entre actividades.....	94
5.2.	Evaluación de los cronogramas.....	96
5.2.1.	Lógica de programación.....	97
5.2.2.	Tipos de relaciones.....	97
5.2.3.	Holguras largas.....	97
5.2.4.	Duraciones muy largas.....	98
5.2.5.	Actividades demoradas.....	98
5.2.6.	Índice de rendimiento de la línea base.....	98
5.2.7.	Evaluación de la ruta crítica.....	99
5.3.	Revisión de avance y rendimiento.....	100
5.4.	Planteamiento de desarrollo de herramientas iterativas para el diseño de ejecución.....	101
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>107</b>
6.1.	Conclusiones.....	107
6.2.	Recomendaciones.....	110
<b>7.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>111</b>

## Lista de figuras

Pág.		
<b>Figura 1-1:</b>	Etapas de la metodología de investigación aplicada. ....	33
<b>Figura 2-1:</b>	Fases de elaboración del diseño de ejecución para un proyecto de construcción. ....	44
<b>Figura 3-1:</b>	Enfoque tradicional .....	50
<b>Figura 3-2:</b>	Enfoque ágil .....	52
<b>Figura 3-3:</b>	Propuesta metodológica del enfoque híbrido.....	54
<b>Figura 3-4:</b>	Metodología en cascada.....	56
<b>Figura 3-5:</b>	Metodología Kanban.....	62
<b>Figura 3-6:</b>	Metodología Iterativa.....	64
<b>Figura 3-7:</b>	Metodología Incremental.....	65
<b>Figura 3-8:</b>	Metodología BIM .....	67
<b>Figura 3-9:</b>	Representación de la secuencia de actividades mediante DSM. ....	68
<b>Figura 3-10:</b>	Relaciones de actividad secuenciales, paralelas, acopladas y condicionales en el proceso DSM .....	69
<b>Figura 3-11:</b>	Redes neuronales .....	73
<b>Figura 3-12:</b>	Enfoques de desarrollo de proyectos .....	76
<b>Figura 3-13:</b>	Árbol de decisiones para definir metodologías de gestión.....	79
<b>Figura 3-14:</b>	Árbol de decisiones para definir modelos / herramientas de sistemas complejos .....	80
<b>Figura 4-1:</b>	Incremento del número de publicaciones desde el 2001 hasta el 2022..	84
<b>Figura 4-2:</b>	Países con mayor número de autores en el campo de conocimiento .....	85
<b>Figura 4-3:</b>	Categorización de artículos de revistas en función del análisis de contenido.....	87
<b>Figura 5-1:</b>	Relación entre actividades de diseño. ....	94
<b>Figura 5-2:</b>	Formalización de 16 maneras de relaciones indirectas de actividades (F: Fin ; S: Comienzo).....	95
<b>Figura 5-3:</b>	Reportes de auditoría de las métricas que generan esquemas configurados a través de Power-BI .....	99
<b>Figura 5-4:</b>	Diagrama de flujo estructura de diseño de ejecución .....	104

## Lista de tablas

**Pág.**

<b>Tabla 4-1:</b>	Revistas con más publicaciones de los documentos seleccionados .....	83
<b>Tabla 4-2:</b>	Dispersión de publicaciones en simulación de la construcción .....	92



# Introducción

La fase de diseño de un proyecto de construcción es cíclica, repetitiva y evolutiva en el tiempo, en ésta se debe involucrar a diversos actores (diseñadores arquitectónicos, estructurales y de instalaciones técnicas, inversionistas e incluso el usuario final), intercambiando información desde el momento en que se genera la idea de desarrollo, hasta su terminación. El intercambio de información con frecuencia se da de manera no estructurada, generando ciclos/bucles que se denominan iteración de diseño (Mujumdar & Maheswari, 2018). Dichas iteraciones deben ser bien planificadas para evitar reprocesos que generen retrasos, sobrecostos o modificaciones al alcance del proyecto y permitan realizar la evaluación del diseño de ejecución para tomar medidas preventivas, predictivas, y correctivas, cuando sea necesario.

Si se quiere lograr el éxito de un proyecto, es preciso hacer una correcta planificación de los diseños y de su ejecución, por lo tanto, se deberá gestionar el intercambio de información entre los diferentes diseñadores e interesados que intervienen, teniendo en cuenta que el intercambio se hace de manera cíclica (Maheswari & Varghese, 2007).

Así mismo, la iteración es un aspecto importante de cualquier proyecto de diseño, que se da en ciclos no definidos hasta que se completa el proceso, incluso en la industria de la construcción se presenta durante la fase de ejecución. Si estas iteraciones no se anticipan y se planifican de manera adecuada, el reproceso, la repetición y el rediseño pueden ocurrir al azar, resultando en una sobrecarga de tiempo y costos, evidentes durante la fase de ejecución (Mujumdar & Maheswari, 2018).

Estudios de revisión sistemática de la literatura acerca de la aplicación de simulación en la industria de la construcción, han evidenciado barreras en su adopción debido a la incapacidad de las herramientas de simulación actuales para capturar la realidad de los sistemas de construcción; la imprecisión de la conceptualización de las operaciones de construcción en los estudios de simulación, es la principal brecha entre la academia y la industria (Abdelmegid et al., 2020).

Por otra parte, Darko et al. (2020) recomienda que para que el sector de la construcción experimente una correcta adopción de la cuarta revolución industrial (tecnología 4.0) se requiere la introducción de cambios y la reestructuración de los procesos para maximizar la eficiencia y aprovechar todas las ventajas competitivas que generan proyectos más seguros.

En consecuencia, debido a los errores que se pueden generar, a la falta de planificación y a la manera como se realiza el intercambio de información entre los diferentes actores (diseñadores, gerencia de proyectos y/o propietario) en la fase de diseño de los proyectos de construcción, se hace necesario, estudiar las metodologías de gestión existentes y buscar herramientas, que permitan plantear soluciones a los vacíos de información que se generan por iteraciones no configuradas, ni parametrizadas y así, determinar elementos y criterios que admitan procesos que optimicen los flujos de trabajo y gestión de información.

Esta tesis tiene como objetivo establecer lineamientos para desarrollar una herramienta informática que permita realizar modelos iterativos predictivos, que se centren en la planificación y el control del proyecto para predecir y controlar los resultados. Al mismo tiempo, reconocen que los proyectos pueden cambiar y evolucionar durante su desarrollo, lo que permite una mayor flexibilidad para adaptarse a los cambios. Los modelos iterativos predictivos se fundamentan en la integración de metodologías y herramientas empleadas para la gestión de diseño del proyecto (diseño del objeto) y diseño de ejecución (diseño de producción), que permitan optimizar los procesos en las diferentes fases de un proyecto de construcción.

El trabajo inicialmente presenta la justificación del problema y el resto del documento se presenta en seis capítulos de la siguiente manera:

*Capítulo 1:* presenta el problema, los objetivos y la metodología de la investigación que se llevó a cabo a partir de una revisión sistemática de la literatura.

*Capítulo 2:* presenta el marco teórico conceptual, se identifica el estado del arte en los temas consultados sobre diseño de ejecución en la construcción y la gestión de proyectos.

*Capítulo 3:* identifica los enfoques, metodologías y métodos aplicados a la gestión de proyectos de construcción para conocer los principios, sistemas de prácticas, técnicas y procedimientos que se emplean de manera conjunta para alcanzar un objetivo.

*Capítulo 4:* realiza la categorización de estudios de investigación sobre aplicaciones de simulación en la construcción, por medio de análisis bibliométricos y de contenido de las herramientas de gestión de diseño y diseño de ejecución.

*Capítulo 5:* determina las variables de trabajo para el desarrollo de herramientas iterativas de gestión y planificación que permitan optimizar el diseño de ejecución, teniendo en cuenta la secuencia de actividades y dependencia entre éstas, criterios de evaluación de los cronogramas y revisión de avances y rendimientos.

*Capítulo 6:* presenta las conclusiones y recomendaciones a partir de los vacíos de conocimiento encontrados para futuras investigaciones.

## Justificación

La industria de la construcción emplea aproximadamente el 7% de la población mundial en edad de trabajar y es uno de los sectores más grandes de la economía mundial, con \$10 billones de dólares gastados en bienes y servicios relacionados con la construcción cada año. Mckinsey Global Institute (MGI, 2017).

En estudio realizado por la consultora internacional McKinsey & Company MGI (2017) se evidenció que, a nivel mundial, el crecimiento de la productividad laboral de este sector es en promedio del 1% anual durante las dos últimas décadas, muy por debajo del 2,8% de la economía mundial total y del 3,6% de la industria manufacturera.

Estos indicadores ofrecen una perspectiva que sugieren que la industria de la construcción actual, no atiende a las necesidades globales y se queda atrás por factores tales como la carencia de activos de calidad, falta de innovación, entrega tardía de proyectos y altos costos (Del Savio, 2022).

En consecuencia, se debe trabajar en mejorar la productividad para generar escenarios que permita aumentar el valor agregado en \$1.6 billones de dólares, sumando alrededor del 2 por ciento a la economía global, tal ganancia es equivalente a aproximadamente la mitad de la necesidad anual de infraestructura del mundo (Mischke et al., 2017). Se logrará este propósito sí se reinventa la construcción, una alternativa puede ser la aplicación de metodologías y herramientas de gestión integradas, que permitan realizar la toma de decisiones de manera predictiva, de tal manera que se anticipe la manifestación de los riesgos y dificultades que se generan en los proyectos, desde la concepción misma de éstos y durante el desarrollo de su construcción, para lograr minimizar los retrasos y sobrecostos que se presentan en la ejecución. Mahoma et al. (2020) afirman que un



componente clave para mejorar la productividad es adoptar más ampliamente las herramientas digitales y un enfoque más eficiente para la ejecución del proyecto.

Los proyectos en la industria de la construcción poseen características particulares como la heterogeneidad, la fragmentación, complejidad, dinamismo y alto riesgo, por lo que la gestión de este tipo de proyectos de forma tradicional, depende en gran medida de prueba y error, lo que puede conducir a resultados no deseados; esta situación exige herramientas y métodos analíticos que puedan respaldar un proceso avanzado de toma de decisiones (Behzadan et al., 2015). Por lo tanto la planificación de cualquier proyecto, debe ser un ejercicio que requiera de fundamentos globales e ideas amplias; integrando métodos, riesgos, realidades, posiciones, objetivos, valores y hábitos, que redunden en escenarios flexibles y adaptables a las dinámicas del futuro (Rúa Machado, 2010).

Por consiguiente, esta Tesis se convierte en una oportunidad para sentar bases de desarrollo de una herramienta informática que permita integrar diferentes metodologías de gestión para analizar el comportamiento de un proyecto de construcción de manera iterativa predictiva desde la fase de diseño y durante la ejecución, con el fin de poder optimizar el tiempo y costo, y así aportar al mejoramiento de la productividad en la industria de la construcción, permitiendo una mayor automatización, acceso a la información, comunicación, colaboración y gestión de proyectos más efectiva

# 1. Planteamiento de la investigación

## 1.1 Problema de investigación

La planeación o simulación de la construcción es la técnica de desarrollar y experimentar con representaciones basadas en programas digitales, los sistemas de construcción con el fin de comprender su comportamiento de manera anticipada (Abourizk, 2010). También se puede definir como el acto de planificar la producción de un proyecto construible, es decir, todas aquellas actividades y productos resultantes, que se realizan y obtienen, desde la culminación del proyecto arquitectónico y el inicio de su construcción, llamado **“diseño de ejecución”** (Carvajal Jaramillo, 2013).

El diseño de ejecución debe ser visto como una acción de previsión, sobre lo que puede pasar o se pretenda que pase, pero ello difiere de la realidad en la ejecución de un proyecto, debido a que cuando se planea, lo que se hace es proyectar situaciones y programar eventos, actividades o tareas basadas en aspectos y creencias en un momento determinado en el tiempo (Rúa Machado, 2010).

A su vez el diseño de ejecución permite que quien toma decisiones comprenda el comportamiento del sistema y prospecte eventos futuros sin tener que probar escenarios e interferir con las operaciones actuales de un sistema existente (Behzadan et al., 2015).

Sin embargo, los grandes proyectos de construcción de todas las clases de activos suelen tardar un 20% más en su culminación con respecto a lo programado y tienen sobrecostos de hasta 80% de lo presupuestado, por lo tanto, la industria deberá identificar soluciones para transformar la productividad y la entrega de proyectos a través de nuevas tecnologías y prácticas mejoradas (R Agarwal, S Chandrasekaran, 2016), entre las cuales se encuentran la adopción de plataformas integradas que abarque planificación, diseño, construcción, operaciones y mantenimiento de proyectos, así como el modelado de la construcción en 5D y digitalización de procesos.

La industria de la construcción está retrasada frente al uso de herramientas digitales con respecto a otros sectores y tarda en adoptar nuevos métodos y tecnología (Mischke et al., 2017). Los avances significativos que se implementan en la actualidad pueden transformar la eficacia y la eficiencia de la construcción.

La necesidad de acercarse a una mayor productividad requiere la rápida adaptación y migración hacia los sistemas digitales, ya que éstos ofrecen una solución eficaz para superar la complejidad de la colaboración en la construcción (Ezzeddine & García de Soto, 2021). Las herramientas digitales también permiten desarrollar modelos basados en plataformas que conectan las partes interesadas durante el curso de un proyecto, desde el diseño hasta la construcción, integrando sistemas, información, procesos y personas, a través de metodologías, para enfrentar el efecto de cambios simultáneos durante la fase de ejecución que se pueden acumular en serie o en paralelo, por lo que resulta importante para la dirección del proyecto, estar al tanto de los flujos de procesos y así poder tomar medidas de previsión para controlar las desviaciones asociadas a la calidad y alineamiento de la información.

Resulta beneficioso para el proyecto tener la capacidad de evaluar previamente las posibles desviaciones, para lo cual se debe definir un diseño de ejecución que promueva la elaboración de alternativas, que estén acordes con el alcance y las necesidades de éste y permitan sortear los imprevistos que generan los cambios no planificados en cada una de las fases de diseño de un proyecto, las cuales se describen a continuación.

- a. Análisis de necesidades: identificar las necesidades y los objetivos del proyecto, se definen los requisitos y se establecen los criterios de éxito.
- b. Planificación: elaborar un plan detallado para el proyecto, incluyendo la definición de tareas, plazos, recursos y presupuesto.
- c. Diseño conceptual: crear bocetos y modelos a escala para ilustrar la idea principal del proyecto.
- d. Diseño detallado: elaborar los planos y especificaciones detalladas del proyecto, incluyendo todos los aspectos técnicos y estéticos.
- e. Evaluación y aprobación: revisar y aprobar los diseños y se preparan los planos y especificaciones finales.

- f. Implementación: construir el proyecto de acuerdo con los planos y especificaciones aprobados.
- g. Monitoreo y control: monitorear los progresos del proyecto y se realizan ajustes según sea necesario para garantizar el cumplimiento de los plazos y presupuesto.
- h. Cierre del proyecto: completar y cerrar el proyecto, se hacen las evaluaciones finales, se documentan los resultados y lecciones aprendidas para futuros proyectos.

La fase inicial de diseño es crucial para alcanzar los objetivos de un proyecto de construcción, en esta se toman decisiones que afectan el alcance del proyecto generando impactos en su duración y costo. Una forma de facilitar la toma de decisiones es explorar tantas alternativas de diseño como sea posible y encontrar la más adecuada (M. H. Sakikhales et al., 2017). Sin embargo, el flujo de trabajo de la gestión de proyectos de construcción tradicional, limita los procesos de diseño iterativos que permiten explorar y evaluar diferentes alternativas de diseño, por el contrario, las decisiones de diseño suelen tomarse sin evaluar rigurosamente el costo beneficio, sobre todo cuando se emplean métodos convencionales de control de proyectos, como la estructura de desglose del trabajo (EDT) y el método de la ruta crítica (CPM), de uso común en el sector de la construcción (PMI, 2021). Estos procesos lineales no permiten las iteraciones y son criticados por ser inflexibles, no ser del todo adecuados para la gestión de proyectos complejos y no tener la capacidad de tener en cuenta el proceso cíclico, principalmente debido a su forma de progresión unidireccional. Adicionalmente no consideran todas las variables involucradas para garantizar el cumplimiento de requisitos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se pueden plantear las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuáles son las principales metodologías de gestión y herramientas de planeación, empleadas en la gestión de proyectos y en la industria de la construcción en el diseño de ejecución a nivel global?

¿Cuáles deben ser las variables sugeridas para el desarrollo de herramientas integradas para la predicción, control de proyectos y su construcción?

La investigación de planificación o simulación de construcción necesita de una revisión exhaustiva sobre los desafíos que esta industria afronta, por lo tanto, el problema radica en que en la revisión bibliométrica no se detectó que se hayan parametrizado y evaluado herramientas de planificación existentes de manera conjunta para realizar la gestión de diseños y diseño de ejecución a través de procesos de iteración verificables de manera anticipada, que permitan aumentar la eficiencia y la productividad en el desarrollo del proyecto, así como la disminución de los sobrecostos, reprocesos, y esfuerzos duplicados entre los diferentes actores involucrados en los procesos de diseño y gestión del proyecto

## **1.2 Objetivo general**

Establecer parámetros para desarrollar una herramienta informática, que permita realizar modelos iterativos predictivos, fundamentados en la eficiencia de herramientas empleadas para la gestión de diseño y diseño de ejecución en proyectos de construcción.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Desarrollar el estado del arte de los enfoques, metodologías y/o métodos de gestión de proyectos aplicados al diseño de ejecución o modelado de la construcción.
- Identificar las metodologías y herramientas para la gestión de diseño y diseño de ejecución, a partir de modelos iterativos predictivos, que se emplean en la gestión de proyectos de la industria de la construcción.
- Categorizar los estudios de aplicaciones de diseño de ejecución empleados en las diferentes fases de un proyecto de construcción a partir de análisis bibliométricos y de contenido, de los sistemas de gestión de diseño y diseño de ejecución, en cuanto a la variable velocidad de ejecución/iteración.
- Determinar las variables de trabajo, para optimizar las prácticas de planificación en procesos de gestión de diseños, diseño de ejecución y desempeño del proyecto, que permitan establecer parámetros de desarrollo de una herramienta de gestión de proyectos y de ejecución.

## 1.4 Metodología de la investigación

Previo a iniciar una investigación, se debe acoger una forma determinada de explicar el hecho específico, que incluye un paradigma de investigación (Mackenzie & Knipe, 2006). La utilidad de acoger un cierto paradigma se asocia principalmente con guiar la forma en que se aborda la explicación de un problema de investigación y determinar métodos apropiados para dar respuestas válidas a las preguntas de investigación (Rudeli, 2019). A su vez permite establecer aspectos clave necesarios para interpretar y analizar los resultados, orientando la forma de presentarlos.

El pensamiento sistémico en las organizaciones es una forma de abordar los problemas y desafíos complejos que enfrentan las empresas y las organizaciones en general, y de reconocer que las organizaciones son sistemas complejos, formados por múltiples elementos interconectados, y que cualquier cambio en uno de estos elementos puede tener efectos en todo el sistema.

El enfoque del pensamiento sistémico implica comprender la organización como un todo integrado, en lugar de tratar de resolver los problemas de manera fragmentada o reduccionista. El objetivo es comprender las relaciones entre las partes del sistema y cómo interactúan entre sí, con el fin de identificar soluciones que tengan en cuenta el impacto en todo el sistema (Garciandía I., 2011).

El pensamiento sistémico también implica una mentalidad de aprendizaje continuo y de mejora, donde se busca comprender cómo los cambios en el sistema afectan los resultados y se realizan ajustes en consecuencia. Esta mentalidad de mejora continua se basa en la idea de que la comprensión del sistema es siempre incompleta y que siempre hay margen para mejorar la comprensión, la eficacia y eficiencia.

La capacidad para planear un proyecto en un entorno dinámico como lo es la industria de la construcción (que frecuentemente desborda los esquemas y procesos establecidos, llevando a un panorama de desconcierto e incertidumbre), hace necesario tomar como referencia elementos del paradigma de la complejidad, que puede acercar a un entendimiento integral de la propia acción de planear un proyecto, ya que este paradigma se caracteriza por tres aspectos interrelacionados: la unidad y la diversidad, la organización

y el desorden, y la determinación y la incertidumbre (Morin, 1996). Los sistemas complejos son unidades compuestas por partes interdependientes y diversas, cuyas interacciones y relaciones son difíciles de predecir. Estos sistemas pueden ser organizados y estructurados, pero también pueden ser caóticos y desordenados. Además, la determinación y la incertidumbre coexisten en los sistemas complejos, lo que significa que los eventos futuros son impredecibles y dependen de múltiples factores.

El paradigma de la complejidad de Morin (1996) aboga por un enfoque transdisciplinario, que abarque múltiples disciplinas y enfoques para entender los sistemas complejos. Según Morin, este enfoque debe ser holístico.

Por otro lado, Maldonado (2003) menciona que los sistemas complejos:

“se ocupan de explicar el tipo de sistemas cuyo comportamiento no puede ser explicado a partir de los componentes del sistema, sino, por el contrario, como el resultado de interacciones no lineales entre los componentes del sistema. El comportamiento resultante es emergente” (p.106).

Sin lugar a dudas, atender la investigación desde la perspectiva de los sistemas complejos nos remite al concepto como tal de la autopoiesis propuesto por Maturana y Varela en 1971. La autopoiesis es un concepto eminentemente biológico, pero para el interés de esta tesis, es necesario articularlo con las perspectivas propuestas por Luhmann y Kauffman (auto organización). Los sistemas autopoieticos son capaces de adaptarse al medio externo, pero también tienen la capacidad desde su estructura de obtener información del entorno, procesarla, y así mismo modificar su propia realidad, en pocas palabras, son grupos de trabajo autónomos que ofrecen posibilidades de autogestión (Molano Mateus, 2012)

Un enfoque de investigación implica la intersección de estos paradigmas con el diseño de la investigación y los métodos específicos seleccionados. Cada modelo de investigación tiene sus propias características, áreas de aplicación, ventajas y desventajas. No existe un enfoque único que tenga un problema de investigación determinado para una solución absoluta.

Dos de los enfoques de investigación que se utilizan para generar conocimiento, basados en los paradigmas de investigación son: el enfoque cuantitativo y el cualitativo.

Enfoque cuantitativo: se basa principalmente en el paradigma positivista. Se centra en la medición y el análisis de datos numéricos para identificar patrones y relaciones entre variables (Hernández Sampieri, 2014). En el sector de la construcción se puede usar para medir y analizar datos numéricos sobre la industria, como costos, productividad, eficiencia, entre otros.

Enfoque cualitativo: se basa en el paradigma constructivista (fenomenológico). Se centra en comprender y explorar los significados, experiencias y perspectivas de las personas mediante el análisis de datos no numéricos, como entrevistas, observaciones y análisis de documentos. La investigación cualitativa utiliza técnicas de análisis de datos como el análisis de contenido y el análisis temático, se utiliza para comprender las percepciones, opiniones y experiencias de los diferentes actores (Hernández Sampieri, 2014).

De la combinación de ambos enfoques, surge la investigación mixta, que incluye las características individuales de cada uno de ellos, pero señalando que ambos enfoques comparten ciertas coincidencias, (Mackenzie & Knipe, 2006). La investigación mixta se utiliza para validar y profundizar en los resultados obtenidos a partir de un solo enfoque de investigación, por esta razón es el enfoque empleado en esta tesis para dar respuesta a las preguntas planteadas.

Como estrategia de investigación se llevó a cabo una metodología de investigación interdependiente que se divide en tres etapas, como se muestra en la figura 1-1: búsqueda de la literatura, análisis de la literatura y síntesis y discusión de los hallazgos.



**Figura 1-1:** Etapas de la metodología de investigación aplicada.



Fuente: Adaptado de (Abdelmegid et al., 2020)

En la primera etapa se buscó en la literatura para identificar estudios pertinentes a las preguntas de investigación. Se empleó como método principal la revisión sistemática de la literatura (RSL), pues éste se refiere a un conjunto de metodologías de investigación en evolución para sintetizar estudios existentes que responden a un conjunto de preguntas

de investigación (Borrego et al., 2014), y permiten justificar los resultados de una manera fundamentada, mediante el uso de herramienta estadísticas. En la segunda etapa se realizó un análisis cualitativo de la literatura seleccionada, para describir sus atributos y contenido. En la tercera etapa se abordaron las preguntas de investigación con base en los hallazgos del análisis de la literatura y de la información obtenida de los análisis cuantitativos y cualitativos.

Los detalles de cada etapa se amplían en las siguientes secciones.

### **Etapas 1:**

Se identificaron las metodologías y herramientas de gestión de proyectos que se usan de manera común en el sector de la construcción y fueron establecidas en el primer objetivo específico de esta investigación, para lo cual se dispuso un protocolo de búsqueda de la literatura donde se incluyeron las bases de datos relevantes, las palabras clave y los criterios de inclusión/exclusión, de acuerdo a los parámetros establecidos por Borrego et al. (2014).

Scopus y ScienceDirect fueron las bases de datos principales para buscar trabajos académicos. Estas bases de datos son conocidas por cubrir las principales revistas y conferencias en el campo de la planificación.

También se realizaron búsquedas manuales en los perfiles de autor en Google Académico para detectar artículos relevantes que no se hayan incluido en los resultados de búsqueda de las bases de datos.

Para obtener y preseleccionar los elementos relevantes, se utilizó un método de recuperación con criterios de inclusión/exclusión a partir de un conjunto de combinaciones de palabras o frases de búsqueda y conectores lógicos (Y, O) para seleccionar todos los artículos en una base de datos hasta un conjunto lo suficientemente pequeño que se puedan examinar criterios de inclusión más detallados.

**Etapas 2:**

Se aplicó un enfoque bibliométrico sobre 103 artículos que arrojó la búsqueda de literatura seleccionada, para analizar cuantitativamente los artículos, autores, citas, concurrencias de palabras, etc., así como para visualizar los datos analizados.

El análisis bibliométrico no solo constituye la información como el análisis estadístico e índices anuales de publicación, sino que también revela otra información oculta que no se puede extraer explícitamente como coautoría y coincidencia de palabras clave (Khodabandelu & Park, 2021).

Los documentos se seleccionaron mediante un análisis descriptivo y de contenido. El análisis descriptivo se usó para resumir la naturaleza de los documentos con respecto a sus años de publicación, fuentes, autores y temas de investigación. El análisis de contenido proporciona una exploración en profundidad de los documentos. Para esta actividad se tuvo en cuenta los siguientes elementos:

- Distribución cronológica de documentos seleccionados.
- Principales fuentes de los documentos detectados.
- Autores más publicados.
- Documentos citados con mayor frecuencia.
- Análisis temático de los documentos.

El análisis de contenido se hizo sobre el cuerpo de texto para identificar patrones de investigación actuales y conceptos emergentes.

Seguidamente a través de un estudio en profundidad y un análisis cualitativo de los contenidos, se clasificaron los artículos en categorías, subcategorías y grupos de acuerdo a las fases de un proyecto de construcción, así como a la tipología de trabajo que utilizó la

metodología o herramienta para la simulación de proyectos de construcción, cumpliendo así con lo definido en el segundo objetivo específico propuesto.

### **Etapas 3**

En esa etapa se realiza la síntesis y discusión de los hallazgos.

Se determinaron las variables de trabajo encontradas en la revisión de la literatura de las metodologías y herramientas de gestión de proyectos y simulación evaluadas, y su aplicabilidad en el sector de la construcción, y se propusieron parámetros para el desarrollo de modelos informáticos, que permitan la optimización del diseño de ejecución a partir de la integración de diferentes herramientas de planificación empleadas en la industria de la construcción, con el objetivo final de reducir retrasos, reprocesos y sobrecostos en la ejecución, realizando iteraciones que ayuden a definir el diseño de ejecución más óptimo.

Los parámetros definidos como base de desarrollo de la herramienta informática para el diseño de ejecución de manera iterativa se precisaron en función:

- Relacionamiento entre actividades de primer grado (Mujumdar & Maheswari, 2018) y segundo grado (Amer et al., 2022).
- Al protocolo de evaluación de cronogramas establecido por la Agencia de Administración de Contratos de Defensa de EE. UU.
- La información estadística de rendimientos obtenidos en proyectos anteriores o tomados del mismo proyecto una vez iniciada la ejecución, mediante datos de control de avance de ejecución.

A través de este proceso se cumplió con el tercer objetivo específico y se identificaron los vacíos de conocimiento existentes con respecto a las diferentes tendencias de investigación, y se anticiparon futuras direcciones de investigación.

## **2.Marco teórico conceptual**

Previo a relacionar las actividades realizadas durante la presente investigación, se reportan a continuación los resultados del estudio de las referencias bibliográficas consultadas y se realiza una síntesis del marco teórico y del estado del arte, que conceden una visión resumida de la simulación de la construcción o diseño de ejecución.

### **2.1. Iteración y su aplicación en la industria de la construcción.**

La productividad en la construcción se refiere a la eficiencia con la que se lleva a cabo el proceso de construcción, lo que implica maximizar la producción de la ejecución en el menor tiempo posible y con el menor costo. Al implementar estrategias efectivas para mejorar la productividad, se puede lograr una construcción más eficiente, rentable y de alta calidad, lo cual depende de factores como la planificación, la gestión de la ejecución y la tecnología utilizada, entre los principales.

La tecnología digital puede tener un impacto significativo en la productividad, permitiendo una mayor automatización, acceso a la información, comunicación, colaboración y gestión de proyectos más efectiva, por ser una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para sistemas que implican un alto nivel de incertidumbre, complejidad e interdependencia entre los componentes del sistema (Abdelmegid et al., 2020).

A medida que aumenta la complejidad, la elaboración de la información del proyecto y la cantidad de transferencias de datos entre los interesados tiende a expandirse sustancialmente. Como resultado, la comunicación de la información se convierte en un problema importante para la gestión de proyectos de construcción (Muñoz García, 2020)

Es así como, se hace necesario implementar en la industria una correcta planificación de iteraciones, como proceso clave para garantizar que el proyecto se desarrolle de manera efectiva y eficiente. La iteración es el acto de repetir un proceso, para generar una secuencia de resultados, con el objetivo de acercarse a un propósito o resultado deseado, normalmente para mejorarlo (Aravindhan et al., 2012).

En el contexto del diseño de ejecución o simulación de construcción, la iteración se refiere a un proceso repetitivo de diseño y evaluación en el que se mejora y perfecciona el modelo hasta alcanzar un resultado satisfactorio. En cada iteración, el modelo se evalúa y se hacen ajustes hasta que se cumplan los criterios de diseño especificados. Para lo cual se deben tener en cuenta el siguiente proceso:

- a. Planificación y requisitos: definir el plan del proyecto que deberá estar alineado con los objetivos generales del proyecto.
- b. Análisis y diseño: centrar las necesidades y los requisitos técnicos del proyecto. En este paso se llevan a cabo una lluvia de ideas para definir el diseño que eventualmente ayudará a alcanzar los objetivos.
- c. Implementación: crear la primera iteración del entregable del proyecto, la cual debería funcionar para alcanzar el objetivo final de tu proyecto.
- d. Pruebas: probar de la forma que mejor funcione para el proyecto.
- e. Evaluación y revisión: evaluar el éxito de la iteración y centrarse en todo aquello que se necesite cambiar. Si es necesario cambiar algo, se puede volver a iniciar el proceso iterativo y repetir el paso dos para diseñar la iteración siguiente.

El proceso de iteración puede incluir la revisión y actualización de planos, la realización de simulaciones y pruebas, y la incorporación de comentarios y sugerencias de los interesados relevantes. El objetivo es producir un modelo preciso y confiable que cumpla con los requisitos técnicos y estéticos y se convierte en un factor clave para enfrentar los riesgos de costos y plazos en los proyectos de diseño y diseño de ejecución en la construcción.

## **2.2. Importancia del diseño de ejecución en la construcción**

Para entender el diseño de ejecución en la gestión de proyectos de construcción, es importante especificar en qué consiste la planificación, la organización, la dirección y el control como pilares esenciales en la gestión de proyectos.

*La planificación* de los proyectos consiste en definir completamente todos los posibles trabajos requeridos a través del desarrollo de un proyecto documentado en un plan; así como, el establecimiento de metas y objetivos para la organización y la forma como se van a integrar en el trabajo, de tal forma que sea identificado más fácil por los participantes del mismo (Kerzner, 2017).

*La organización* implica la clasificación y división del trabajo en unidades más pequeñas, la obtención de los recursos adecuados y personal suficiente para desempeñar el trabajo y la alineación de las tareas (Guido et al., 2017). Además, establecer qué se necesita hacer, cómo, quién, cuándo y dónde se va a realizar (Rojas López, 2017)

*La dirección* consiste en la implantación de los planes necesarios para alcanzar los objetivos del proyecto, teniendo en cuenta personal calificado, capacitación de éste y asignación de responsabilidades (Kerzner, 2017).

*El control* consiste en comparar y rastrear el avance real con lo planeado; el monitoreo de las tareas asignadas al equipo; la presentación de los avances reales, los programas, los costos y la implementación de acciones correctivas (Berrio, 2015). Para la aplicación de dichas acciones es importante identificar los problemas a tiempo antes de que se agraven y la solución debe ser inmediata (Guido et al., 2017).

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único (Veas & Pradena, 2008). También se puede decir que es una planificación, que consiste en un conjunto de actividades a realizar de manera articulada entre sí, con el fin de producir determinados bienes o servicios capaces de satisfacer necesidades o resolver problemas (Rivas-Cedeño et al., 2017). Dicha planificación debe tener un alcance definido dentro de los límites de un presupuesto y de un periodo de tiempo dados, cumpliendo requisitos de calidad previamente establecidos.

Rojas López (2017), ha afirmado que, el proceso de planificación es un proceso iterativo que se basa en la secuencia: análisis, diagnóstico y formulación de propuestas. Busca resolver de manera anticipada y de forma efectiva la manera de administrar un proyecto, y para esta investigación especialmente aquellos que tengan que ver con la construcción.

La gestión de proyectos inició como disciplina con la aparición del Diagrama de Gantt en 1917, luego tuvo avance hacia finales de la década de 1950 con el desarrollo de los sistemas **CPM** (**Critical Path Method** – método de la ruta crítica) y **PERT** (**Program Evaluation and Review Techniques** - técnica de revisión y evaluación de programas) (Mazurkiewicz, 2018).

En consecuencia, con la aparición de los sistemas de gestión, nace el instituto para la gerencia de proyectos **PMI** (Project Management Institute,) fundado en 1969, el cual se ha dedicado a contribuir con el avance de la práctica, ciencia y profesión de administración de proyectos. Hacia la década de 1970, aparecen los primeros softwares de gestión de proyectos (Warfield, 1973). Desde entonces se han desarrollado, en diferentes industrias (aeroespacial, militar, tecnología, hidrocarburos, etc.), metodologías y métodos que permiten realizar un control en la fase de diseños, para poder obtener planos y especificaciones adecuadas y necesarias, como punto de partida para el correcto desarrollo de la ejecución (Mujumdar & Maheswari, 2018).

El sector de la construcción también ha evolucionado en este sentido, aunque no a la velocidad que lo han hecho otras industrias, pero ha tenido que adaptarse y transformarse para poder desarrollarse y no quedarse rezagado frente a los diferentes avances tecnológicos y de gestión.

Para atender la necesidad de adaptación y transformación de la industria de la construcción, según lo mencionado anteriormente, se plantea que la planificación de diseño de proyectos y diseño de ejecución incluyan la representación de las actividades y sus relaciones de dependencia. La metodología empleada en el sector de la construcción de manera común para planificar las secuencias de actividades y su respectiva duración, ha sido a través de la ruta crítica CPM. Pero esta metodología es muy rígida y no permite valorar de manera anticipada las implicaciones que otras actividades o elementos externos generan en la ejecución del proyecto (Maheswari & Varghese, 2007).

El enfoque tradicional de planificación para la programación de proyectos es el conocido CPM y PERT, para hacer frente a la incertidumbre. Sin embargo, estas metodologías tradicionales tienen debilidades en la programación de proyectos de desarrollo de construcciones, particularmente en términos de modelado de iteración (Qian et al., 2007).



Por otra parte, durante las últimas dos décadas la metodología BIM (Building Information Modeling), ha ganado popularidad al integrar a todos los diseñadores de los proyectos de construcción. Esta metodología puede capturar iteraciones a través de los cambios propuestos por los diseñadores involucrados, utilizando una o varias plataformas tecnológicas o sistemas de información avanzada. Sin embargo, este modelo está limitado para analizar o evaluar iteraciones durante la ejecución y no existe claridad sobre el flujo de los procesos de cada una de las partes involucradas en el desarrollo, que permitan el máximo aprovechamiento de la tecnología disponible para ello (Mujumdar & Maheswari, 2018).

Los retrasos en las actividades son un problema común en la industria de la construcción y generan aumento en la duración de los cronogramas y los costos del proyecto. Para poder minimizar el impacto, se deben realizar reprocesos y rectificación de los diseños del proyecto o diseño de ejecución, ya que dichos retrasos de la actividad principal, pueden detener las actividades sucesivas hasta la finalización de todo el proceso. González et al. (2014) han informado de graves efectos negativos por el incumplimiento de los cronogramas, por lo que su investigación hace mérito en la importancia de identificar el motivo del retraso y gestionarlo de manera adecuada.

Frente a este tipo de aspectos, ha tomado relevancia el uso de métodos alternativos para asegurar una mejor gestión de las interacciones entre actores y lo que estos desarrollan. Una de estas alternativas es la metodología DSM (Dependency Structure Matrix), la cual es usada para gestionar el diseño de sistemas complejos (Steward, 1981), y es una herramienta potencial para las iteraciones de planificación y también para evaluar secuencias alternativas, empleada en diseño de proyectos.

Investigadores del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts), son quienes más han trabajado en el desarrollo de la metodología DSM (Eppinger & Browning, 2018). Durante los últimos 10 años se encuentran publicaciones de investigadores de la India y de China, que han hecho aportes al desarrollo de la metodología, como lo es la matriz de dominio múltiple (MDM), combinación de dependencia estructura de la matriz (DSM) y dominio mapeo matriz (DMM), que puede ser utilizado para mapear las relaciones y las dependencias entre varias entidades (Mujumdar et al. 2014).

Para el sector de la construcción, es importante aportar al desarrollo e implementación de herramientas y de metodologías como DSM o similares. La implementación permitiría que la industria de la construcción sea más eficiente (lograr las metas con la menor cantidad de recursos) y eficaz (alcanzar las metas establecidas). Igualmente, reducir el retrabajo y los reprocesos que son los generadores de sobrecostos y demoras.

Se pretende entonces de manera anticipada establecer rutas de trabajo acertadas a partir de la iteración de variables y en lo posible, llevar a un lenguaje matemático que, con herramientas informáticas estadísticas, permita de manera previa resolver dificultades que se evidencian con los otros modelos de gestión, como el BIM.

### **2.3. El diseño de ejecución y su función en proyectos de construcción**

Un proyecto de construcción es un proceso complejo de programación de tareas, por lo que el progreso en el diseño, la recopilación y el intercambio de información entre el diseñador, el contratista o el consultor de diseño y el inversionista necesita cooperación y una combinación de acciones, como resultado de una repetición continua, incluidas iteraciones y reelaboraciones.

Se deben realizar esfuerzos adecuados para planificar una fase de diseño correcta, por lo que se hace necesario desarrollar herramientas que permitan un mejor control de los procesos y productos que estén dentro de los rangos aceptables de costo y tiempo establecidos al inicio del proyecto y optimizar durante el desarrollo del mismo.

El diseño de ejecución en proyectos de construcción permite a los profesionales experimentar de manera remota sin tener que materializar algún elemento previamente, lo cual, ayuda a producir una mejor comprensión del proceso, costos más bajos, duraciones más cortas, calidad mejorada y mayor certeza en la entrega de éste, si se compara con la planeación que se realiza en muchos proyectos de construcción, en la que se limita a la elaboración de cronograma de actividades.

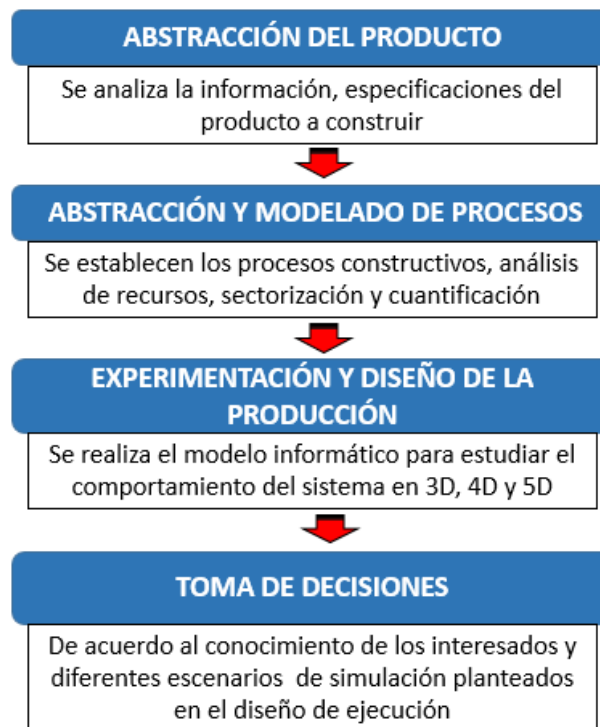
El diseño de ejecución ha experimentado un importante crecimiento académico en las últimas dos décadas, pero no ha sido aprovechado por la industria de manera adecuada, según AbouRizk (2010) no hay mercado para los productos/soluciones de simulación investigados y desarrollados en nuestra industria y/o los profesionales no tienen un marcado interés en usar tales productos. En otras palabras, mientras que los investigadores más experimentados en simulación pueden ver los beneficios de usarla como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la construcción, la industria en general no está aún convencida plenamente de los méritos de herramientas avanzadas.

En general, para elaborar el diseño de ejecución se involucran cuatro fases como se muestra en la figura 2-1, las cuales son: abstracción del producto, abstracción y modelado de procesos, experimentación o diseño de la producción y toma de decisiones.

- a. **Fase de abstracción del producto:** se analizan las especificaciones del producto a construir, en la cual se adelanta la labor de selección y estudio de información sobre el proyecto a ejecutar, con miras a tener suficiente claridad para avanzar en etapas más adelantadas del proceso.
- b. **Fase de abstracción y modelado de procesos:** se abstraen y reducen a modelos los procesos, recursos, entorno, etc., necesarios para construir el producto. Se realiza la subdivisión teórica del conjunto físico a ejecutar en grandes bloques, para facilitar su análisis, cuantificación y producción. Es importante realizar una sectorización del proyecto, con el propósito de independizar los procesos lo máximo posible. Esto permite paralelismo en la ejecución de los procesos constructivos que optimizan el desarrollo de éste.
- c. **Fase de experimentación o diseño de la producción:** la simulación implica la experimentación con el modelo informático para estudiar el comportamiento del sistema subyacente. Esto se logra procesando el modelo utilizando una combinación de simulación de eventos discretos, simulación continua y otros algoritmos (Abourizk, 2010). Los resultados son generalmente parámetros útiles para la toma de decisiones, como el tiempo que demorará completar el proyecto y cada uno de sus componentes, los costos, la utilización de recursos y resolver cuellos de botella en el proceso.

- d. **Fase de toma de decisiones:** utiliza esencialmente el conocimiento, experiencia del usuario y varios análisis de escenarios, empleando los experimentos de simulación o diseño de la producción para estructurar recomendaciones que ayuden a que el proyecto logre los objetivos deseados. Las alternativas o estrategias para abordar el proceso, la programación (actividades, secuencias, precedencias, tiempos, rendimientos), cálculo (cantidades, costos), dotación (herramientas, equipos, cuadrillas), permiten la toma de decisiones detalladas que controlan y guían la fase de producción, objeto del diseño de ejecución.

**Figura 2-1:** Fases de elaboración del diseño de ejecución para un proyecto de construcción.



Adaptado de: (Abourizk, 2010; Carvajal Jaramillo, 2013).

El diseño de ejecución es la imitación de la operación del proceso o sistema del mundo real a lo largo del tiempo. El comportamiento del sistema a medida que evoluciona con el tiempo se estudia mediante el desarrollo de un modelo de simulación.

## 2.4. Estado del arte

De acuerdo a la cantidad de trabajos reportados en la literatura sobre diseño de ejecución para ser aplicados en proyectos de construcción repetitivos, lineales y de infraestructura (edificios, túneles, entre otros.), se debe tener en cuenta varios objetivos con el fin de optimizar costos y tiempos, maximizar la calidad y brindar apoyo a la gestión de proyectos, por lo que se hace una breve descripción de algunos de los trabajos analizados.

(González et al., 2009) Proponen la solución para problemas de variabilidad e incertidumbre en la producción y aumentar su rendimiento a través de un modelo de Análisis Multi-objetivo, para desarrollar una solución gráfica para el diseño del Trabajo en Proceso (WIP, Work-In-Process) en proyectos de construcción repetitivos.

(Agrama, 2012) Esboza para la programación de los proyectos de construcción lineales el enfoque de un modelo de optimización Multi-objetivo. El estudio muestra que un alto porcentaje de los proyectos de construcción son lineales por lo tanto el modelo permite a los encargados de la planificación de los proyectos, generar planes que reduzcan la duración del mismo y las interrupciones de los equipos de trabajo. El modelo se caracteriza por estar basado en la línea técnica de equilibrio y por no considerar la ruta crítica permitiendo traslapar actividades para obtener ganancias en tiempos con la utilización de un enfoque Multi-objetivo de algoritmos genéticos.

(R.F. Aziz, 2013) Propone un Software de Optimización Estratégico (OSS, Optimizing Strategy Software) para calcular datos sensibles en proyectos de construcción repetitivos. Su propósito principal es reducir al mínimo el tiempo y los costos de ejecución del proyecto, y maximizar el capital de trabajo y el valor presente neto simultáneamente.

(Aziz & Hafez, 2013) Plantean un software (SCPMS, Smart Critical Path Method System), para optimizar el uso de los recursos, reducir el tiempo de ejecución de los proyectos y costos del mismo, maximizando la calidad simultáneamente. El modelo integra los conceptos del método CPM para la programación y control de los proyectos de

construcción con un Algoritmo Genético Multi-objetivo, para la planificación y mejora de los grandes proyectos.

(Bakry et al., 2014) Proyectan un algoritmo para la actualización automática, reprogramación dinámica y aceleración optimizada de los proyectos de construcción repetitivos. El algoritmo permite reducir el tiempo de los procesos con el empleo de poco capital adicional, y la eficiencia entre el incremento del costo directo debido a la utilización de más recursos y la rebaja del costo indirecto por la reducción en el tiempo de ejecución del proyecto.

(Khazadi et al., 2016) Plantearon un modelo híbrido que integró el modelado basado en agentes con CPM y algoritmos genéticos (GA) para encontrar la mejor composición de asignación de recursos para las actividades del proyecto de construcción.

(Lee et al., 2019) Propusieron un modelo de fabricación digital basado en BIM generalizado, que se puede aplicar universalmente aunque las características de la fabricación digital puedan cambiar debido a numerosas variables, como el proyecto objetivo, la pieza, el tipo, la forma, la escala y el material. Además, se propuso un modelo de evaluación de la productividad utilizando el modelo de colas para verificar la productividad del proyecto de caso implementado a través del proceso propuesto.

(Abdelmegid et al., 2020) Identificaron 14 barreras existente para adoptar la simulación en la industria de la construcción y el nivel de atención que han recibido éstas por parte de los investigadores. Como resultado de la investigación plantean que el modelado conceptual (fase de estudio de simulación relacionada con la descripción del modelo y la abstracción del sistema) es un aspecto de la simulación que ha recibido poca atención en la investigación de simulación de construcción.

(Yuan et al., 2020) Proponen un método de optimización y planificación lean basado en simulación de eventos discretos (DES-) para la producción de componentes prefabricados mediante la integración de la evaluación de la complejidad (CS), la simulación de eventos discretos (DES) y la gestión lean (LM).

(Khodabandelu & Park, 2021) Realizaron una revisión cuantitativa-cualitativa integrada sobre las aplicaciones de ABM en la construcción como: la impresión 3D, desarrollo de plataformas de código abierto, editables y desarrollables que encapsulen las características de comportamiento e interacción del personal de construcción, y visualización mejorada utilizando modelos híbridos ABM-BIM

(Seresht & Fayek, 2022) Investigaron sobre modelado de operaciones de movimiento de tierras mediante la introducción de un marco híbrido de simulación de eventos discretos y dinámica de sistemas difusos, el cual mejora la precisión de los modelos de operación de movimiento de tierras al aplicar técnicas de simulación para modelar procesos de construcción que involucran variables de entrada dinámicas e incertidumbre subjetiva, a través de su capacidad para capturar la incertidumbre no probabilística de los sistemas de construcción

Teniendo en cuenta la literatura revisada a lo largo de este trabajo, se observa que hay diferentes metodologías y métodos para el desarrollo y optimización del diseño de ejecución en proyectos de construcción.

Estos métodos contienen técnicas fundamentales para efectuar el seguimiento, control de desempeño, rendimientos y tiempos en los proyectos de construcción; los cuales han sido implementados de manera separada, sin conjugar los beneficios que aporta cada uno de manera individual, haciendo complejo la integración, evaluación del resultado final y validaciones futuras que permitan escoger una opción óptima entre diferentes alternativas para ser aplicados en el diseño de ejecución.

### **3. Enfoque, metodología y método en la gestión de proyectos de construcción**

Con el ánimo de comprender los avances tecnológicos que se están dando en la gestión de proyectos y ejecución de construcciones a nivel mundial, es indispensable determinar cuáles son las principales metodologías de gestión y la aplicación de las diferentes herramientas que se manejan en la actualidad, para así establecer cuál es el conocimiento de punta, que permite definir uno de los desafíos de esta investigación, que es identificar las metodologías y herramientas para la gestión de diseño y diseño de ejecución en proyectos de construcción.

Para abordar el desarrollo de un proyecto de construcción es necesario diseñar la metodología de gestión de manera específica. El desafío es definir qué características del proyecto son importantes para esa decisión. Además, el reto es definir una metodología de gestión de proyectos que pueda basarse en diferentes enfoques y que sea altamente personalizable para cada proyecto dentro de un contexto organizacional específico (Špundak, 2014).

Con el fin de cumplir con ese propósito es necesario observar el nivel de los elementos metodológicos utilizados para construir una metodología específica y responder a las siguientes preguntas:

- ¿Es posible construir una metodología con elementos basados en diferentes enfoques?
- ¿Cuál es el nivel de detalles requerido para construir la metodología?

Gemino et al. (2021) sostienen que los enfoques para la gestión de proyectos, la mejora de procesos y el desarrollo de productos están evolucionando a un ritmo rápido, impulsados por cambios en la estrategia, la cultura y las prácticas organizacionales, y los avances tecnológicos.

Para poder comprender mejor el contexto de la gestión de proyectos en la actualidad se hace necesario distinguir y definir los términos: “enfoque, metodología y método”, los cuales se amplían a continuación.



---

El enfoque de gestión de proyectos es el nivel más alto de abstracción utilizado al describir cómo se diseñará y gobernará un proyecto. El enfoque está relacionado con el aspecto interno de la gobernanza del proyecto (Lappi et al., 2018).

Para Špundak (2014, p. 941) “un **enfoque** de gestión de proyectos es un conjunto de principios y directrices que definen la forma en que se gestiona un proyecto específico”, una metodología es más prescriptiva y granular que un enfoque y brinda, a la gerencia de proyecto, una guía operativa detallada sobre cómo administrar un proyecto.

Según se define en A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Seventh Edition PMI (2021, p. 45), “una **metodología** es un sistema de prácticas, técnicas, procedimientos y reglas utilizadas por quienes trabajan en una disciplina”. Las metodologías son combinaciones de métodos que, en conjunto, forman un todo.

Al respecto Gemino et al. (2021) mencionan que “Un **método** de gestión de proyectos se puede definir como un conjunto de técnicas o procedimientos utilizados para gestionar un aspecto de una metodología dentro de un proyecto y permiten alcanzar un objetivo”. Se trata de una serie de pasos a seguir, un esquema, para llegar a una meta. Conceptualmente, los métodos pueden considerarse por separado desde su origen dentro de una metodología y pueden combinarse entre metodologías o entre enfoques dentro del mismo proyecto.

### **3.1. Enfoques de gestión de proyectos**

El término enfoque de gestión de proyectos se utiliza con mayor frecuencia como un conjunto de principios y directrices que definen cómo se gestiona un proyecto específico (Špundak, 2014). Y se dividen en tradicional, ágil e híbrido.

#### **3.1.1. Enfoque tradicional**

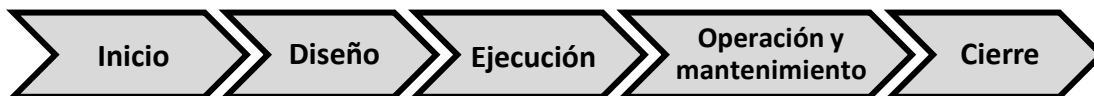
El enfoque tradicional se define por métodos de planificación de proyectos lineales y predecibles, diseñados para lograr un conjunto de objetivos comprensibles y con límites claramente definidos, para finalizar dentro del tiempo, el presupuesto y el alcance planificados manteniendo los estándares de calidad (Gemino et al., 2021). Los principios

establecidos en la década de 1950 han prescrito que los métodos y procedimientos deben aplicarse a cada proyecto de manera uniforme. El objetivo final del enfoque tradicional de gestión de proyectos, es la optimización y la eficiencia en el seguimiento del plan inicial detallado del proyecto (Gemino et al., 2021).

Aunque el enfoque tradicional de la gestión de proyectos enfatiza la robustez como una ventaja, determinar que los mismos métodos y técnicas podrían aplicarse a los proyectos de manera uniforme, se considera cada vez más como una desventaja crucial de este enfoque (Špundak, 2014), pues no es un modelo apto para proyectos de gran tamaño, es poco efectivo si los requisitos no son establecidos claramente desde el inicio, además, de ser una metodología lineal y rígida, carece de flexibilidad para adaptarse a sucesos inesperados (Poza, 2018).

Una metodología inapropiada puede tener un impacto negativo en el éxito del proyecto o al menos dificultar la gestión del mismo. La figura 3-1 indica el ciclo de vida secuencial del enfoque tradicional de gestión de proyectos de construcción fundamentado en el PMI, el cual incluye cinco fases: factibilidad, diseño, construcción, operación y mantenimiento y cierre.

**Figura 3-1:** Enfoque tradicional



Fuente: Elaboración propia

A propósito del enfoque tradicional el PMI (2021) dice que:

Las fases del proyecto suelen tener una revisión de puerta de la fase para comprobar que los resultados deseados o los criterios de salida de la fase se han alcanzado antes de pasar a la siguiente fase. Los criterios de salida pueden estar relacionados con los criterios de aceptación de los productos, las obligaciones contractuales, el cumplimiento de rendimientos específicos u otras medidas tangibles (p. 42).

### 3.1.2. Enfoque ágil

Durante las últimas dos décadas nuevos enfoques han aparecido bajo nombres diferentes enfatizando la diferencia con el enfoque tradicional. El nombre más utilizado es enfoque ágil, el cual se ha caracterizado por su adaptabilidad a los cambios, a diferentes tipos de proyectos y su ciclo de vida. El cambio es inevitable, por lo que los nuevos enfoques adoptan los cambios y reconocen que es poco común crear un plan de proyecto completo al comienzo del mismo. Esa es la razón por la que los nuevos enfoques enfatizan ante todo la importancia de la ejecución y dividir el trabajo en distintas iteraciones a lo largo del proyecto, en contraste con el enfoque tradicional, donde el énfasis está en la planificación minuciosa (Špundak, 2014).

La guía de práctica ágil PMI, (2017) menciona que los líderes del pensamiento en la industria del software formalizaron el movimiento de ágil en 2001 con la publicación del Manifiesto para el Desarrollo Ágil de Software, en el cual establecieron cuatro valores centrales que se pueden implementar de manera similar en la industria de la construcción:

- Individuos e interacciones, sobre procesos y herramientas.
- Software en funcionamiento, sobre documentación integral.
- Colaboración con el cliente, sobre negociación de contratos.
- Respuesta al cambio, sobre seguimiento de un plan.

La agilidad, se basa en varios principios comerciales, como la innovación continua, la adaptación de producto, la reducción de tiempos de entrega, el ajuste de personas y procesos y la confiabilidad de los resultados (Highsmith, 2004). Además, el entorno ágil es definido por Chin (2004) como aquel que ante todo contiene cierta cantidad de incertidumbre, requiere conocimientos específicos y destaca la necesidad de entregar el proyecto lo antes posible.

Highsmith (2004) ha propuesto cinco fases del enfoque ágil de gestión de proyectos:

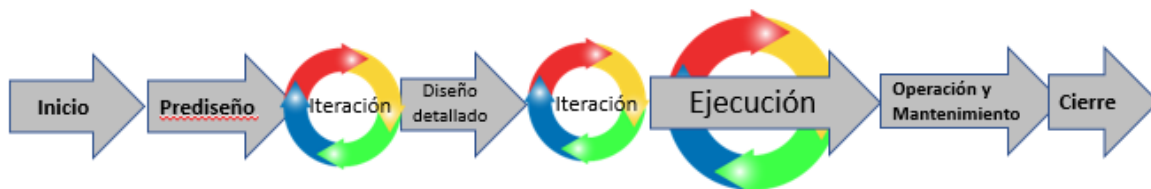
Imaginar (definir la visión, el alcance del proyecto y la organización del proyecto),  
Especular (desarrollar un modelo definido por las características del producto y las

limitaciones de tiempo, y un plan de iteración para la implementación de la visión), *Explorar* (entregar piezas probadas en poco tiempo y buscar continuamente una forma de reducir el riesgo y la incertidumbre del proyecto), *Adaptar* (verificar los entregables, la situación actual y el comportamiento del equipo para adaptarse si es necesario) y *Cerrar* (cerrar el proyecto, crear lecciones aprendidas y celebrar).

La filosofía del enfoque ágil es aceptar cambios durante el proyecto (Aguanno, 2004), por lo que el enfoque ágil se basa en un enfoque iterativo. Se construye dinámicamente en cada iteración y no solo ayuda a construir el alcance final del proyecto, sino que también puede ayudar a una ejecución más rápida del mismo, al brindar beneficios tempranos, contribuyendo a lograr un mejor control de los proyectos inciertos (Benediktsson & Dalcher, 2005).

En la figura 3-2 se observa las iteraciones que se pueden dar entre las diferentes fases de un proyecto de la industria construcción, e inclusive al interior de una fase como la de ejecución, donde se concentran gran parte de los esfuerzos por optimizar y mejorar la productividad.

**Figura 3-2:** Enfoque ágil



Fuente: Elaboración propia

### **3.1.3. Enfoque híbrido**

Los enfoques híbridos son la combinación de los métodos básicos (tradicional y ágil). Es importante mencionar que el enfoque tradicional es más usado para proyectos con requisitos iniciales definidos por el cliente y objetivos claros del proyecto, por lo tanto, con un nivel de incertidumbre más bajo (Špundak, 2014).

Cabe resaltar que el enfoque tradicional es apropiado para proyectos donde se requiere documentación formal, en cualquier momento del proyecto (Boehm, 2002). Sin embargo, los métodos tradicionales de gestión de proyectos ya no pueden abordar los desafiantes requisitos para dominar la creciente complejidad. En situaciones de incertidumbre, la acción racional orientada a la planificación solo es factible en un grado limitado y se requiere de improvisación frente a los imprevistos (Serrano Machado, 2022)

Por otra parte, el enfoque ágil de gestión de proyectos se caracteriza por ser empleado en proyectos con un alto nivel de incertidumbre, objetivos del proyecto poco claros o solicitudes incompletas e impredecibles, los cuales son los escenarios complejos de los proyectos de construcción, por lo que se podría suponer que cambiarán significativamente durante el curso del proyecto debido a las constantes solicitudes de cambio. Los proyectos se organizan de forma iterativa, no lineal, con frecuentes modificaciones y actualizaciones del plan del proyecto y requieren una estrecha y frecuente colaboración con el usuario final durante el proyecto (Coram & Bohner, 2005)

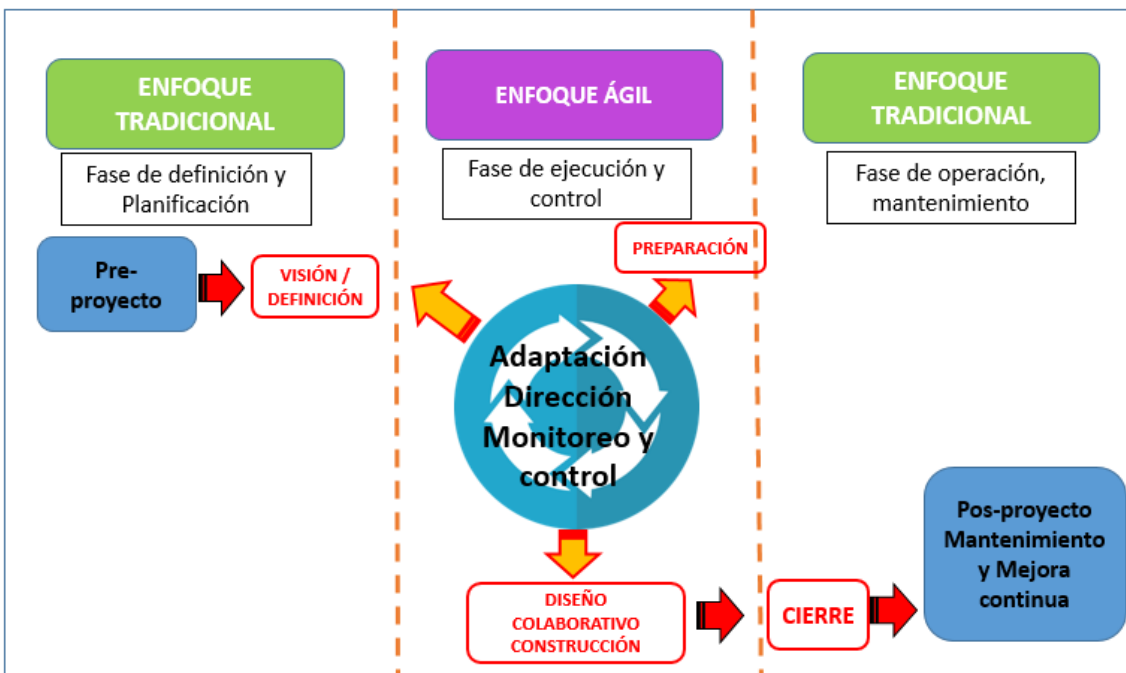
Se plantea que la metodología de gestión de proyectos más adecuada, podría ser una combinación de elementos basados en un enfoque ágil y elementos basados en un enfoque tradicional, lo cual potencia las bondades de ambos enfoques, para la gestión de proyectos de construcción (Poza, 2018).

A medida que los proyectos se vuelven más complejos, ha surgido la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para manejar esa complejidad a través de un tercer enfoque

llamado enfoque híbrido, con el cual los equipos de proyecto se están ajustando a sus realidades organizacionales y combinan metodologías y métodos que mejor se adaptan a su contexto particular. Los equipos que operan en entornos tradicionales, pueden adoptar ciertas técnicas ágiles, por ejemplo, reuniones diarias de control de avance o iteraciones más cortas, para mejorar sus resultados durante la fase de planificación o fase de ejecución (Gemino et al., 2021).

Se observa en la figura 3-3 la relación entre el enfoque tradicional y el enfoque ágil, para conformar el enfoque híbrido en tres fases: definición y planificación, ejecución y control, evaluación final y cierre, basados en el ciclo de vida de PMI.

**Figura 3-3:** Propuesta metodológica del enfoque híbrido.



Fuente: Adaptado de (Cristaldo et al., 2018).

## **3.2. Metodologías para la gestión de proyectos**

El PMI define la dirección de proyectos como: la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a actividades del proyecto para cumplir los requisitos del mismo. La gestión del proyecto se refiere a la orientación del trabajo del proyecto para obtener los resultados previstos. Los equipos de proyecto pueden lograr los resultados utilizando una amplia gama de enfoques (por ejemplo, tradicional, híbrido y adaptativo) (PMI, 2021, p.4).

La gestión de proyectos es un conjunto de metodologías para planificar y dirigir los procesos de un proyecto. Las principales metodologías se diferencian no solo por la manera en que están estructuradas, sino también por la naturaleza de las entregas, los flujos de trabajo y en ocasiones por los softwares de gestión. Elegir correctamente la metodología en un proyecto de construcción permite estandarizar, estructurar y organizar la manera en la que se va a ejecutar el proyecto, además, optimizar los tiempos, estimar costos, minimizar riesgos, entre otros. Y también, generar una mejora continua al aprender de los errores y replicar los éxitos, siendo la metodología una gran herramienta para generar eficiencia en un proyecto (Aguirre Barrera & Aguirre Barrera, 2020).

A continuación, se describen las principales características de las metodologías y métodos que se emplean en la gestión de proyectos de construcción de manera concreta, con el fin de poder tener claridad al aplicar éstas en el diseño de ejecución en la construcción.

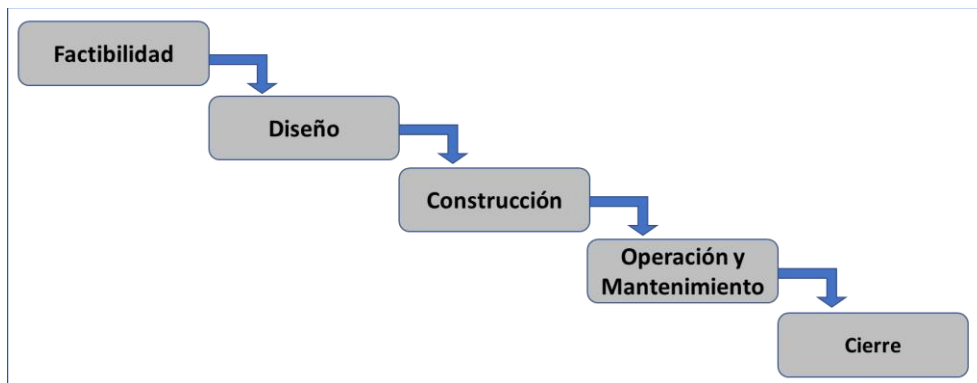
### **3.2.1. Metodologías y métodos del enfoque tradicional**

#### **Cascada**

También conocida como Waterfall o Predictiva, es una metodología del marco tradicional que fue implementada por primera vez en 1970 por Winston W. Royce, y rápidamente, se empezó a adaptar a una gran variedad de industrias debido a su secuencia lógica y facilidad de implementación (Aguirre Barrera & Aguirre Barrera, 2020).

La metodología en cascada, también conocida como ciclo de vida de desarrollo de sistemas (SDLC, por sus siglas en inglés), es un proceso lineal en el que el trabajo se realiza de manera escalonada (similar a una cascada) y en orden secuencial. En esta metodología, todas las tareas están vinculadas por una dependencia como se puede apreciar en la figura 3-4. Esto significa que se debe finalizar cada tarea antes de comenzar con la siguiente.

**Figura 3-4:** Metodología en cascada



Fuente: Elaboración propia

### **Método Técnica de Evaluación y Revisión de Programa (PERT):**

Este método para alcanzar los objetivos establecidos tiene entre sus principales funciones la gestión de la información de los problemas reales y amenazadores de la ejecución de los proyectos (Berrio, 2015), y también la presentación de continuos informes sobre el alcance de los mismos como fechas de finalización, determinación de las actividades importantes y las menos importantes y calcula los tiempos necesarios para ejecutar cada una de ellas. Así mismo, identifica los recursos que pueden ser utilizados eficazmente (Remon Fayek Aziz et al., 2014).

### **Ruta crítica (CPM)**

El método de la ruta crítica (CPM) es un algoritmo matemático que sirve para programar una serie de actividades en un proyecto, y establece cuál es la secuencia más larga de actividades que deben finalizarse a tiempo para completar todo el proyecto. Supone



tiempos de actividades constantes o deterministas. Cualquier retraso en las tareas críticas provocará el retraso del resto del proyecto (Asana, 2021a).

Para usar el CPM es necesario desarrollar un modelo del proyecto que incluya:

- Una lista de todas las actividades necesarias para desarrollar el proyecto.
- Las dependencias entre dichas actividades.
- Una aproximación del tiempo (o duración) de cada actividad.

CPM calcula la ruta más larga para llevar a cabo las actividades planificadas hasta el final del proyecto, y los puntos más tempranos y más tardíos en los que cada actividad puede empezar y finalizar, sin que por ello se retrase el proyecto. Este proceso determina qué actividades son "críticas" (es decir, pueden alargar la ruta del proyecto) y cuáles tienen "flexibilidad total" (se pueden demorar sin que el proyecto se retrase). Este método permite identificar y planificar las tareas críticas dentro de un proyecto (Asana, 2021b). Esto incluye la creación de dependencias de tareas, el seguimiento de los objetivos y el progreso del proyecto, la priorización de las entregas y la gestión de los plazos, que se asemejan a una estructura de desglose del trabajo.

## **Cadena crítica (CCPM)**

Está estrechamente relacionado con el método de la ruta crítica, pero brinda un mayor nivel de detalle, pues no solo se centra en las actividades y su duración y relación de dependencia, sino que introduce un mecanismo para gestionar la incertidumbre, basándose en la naturaleza de los recursos necesarios para ejecutar las actividades del proyecto (Hortigüela Arozamena, 2022), lo que lo convierte en uno de los métodos más completos, respecto a la gestión de proyectos.

La gestión de proyectos por cadena crítica establece tiempos específicos para cada actividad, gestiona la incertidumbre asociada a la duración de las mismas, eliminando la protección implícita agregada a cada una individualmente, y añadiéndola como un buffer (amortiguador) en puntos específicos del proyecto, lo cual es un factor diferenciador con

CPM (Hortigüela Arozamena, 2022). Esto permite hacer un seguimiento más eficiente de las actividades, dejando en claro cuándo se realizan a tiempo o cuándo se retrasan.

La metodología de Cadena Crítica se basa en tres (3) principios (Recursos en Project Management, s.f.):

- a. Identificar restricciones: Se conoce como cadena crítica o camino crítico y normalmente las restricciones se muestran como el conjunto de tareas que definen la duración mínima del proyecto bien sea por las limitaciones temporales o de recursos.
- b. Priorizar tareas: El equipo del proyecto debe enfocarse en la realización de las tareas que formen parte de la cadena crítica ya que estas son las que definen la finalización del proyecto.
- c. De acuerdo con la priorización realizada en el punto anterior, se subordinan el resto de las tareas en la cadena crítica.

Una de las características de la metodología de la Cadena Crítica es que considera la duración de las tareas de forma no determinista, lo que implica que estas no tienen una duración fija, sino variable dentro de unos márgenes (Fuentes et al., 2019).

La incertidumbre es la causante de la mayoría de los retrasos de los proyectos, además, inducen a sobrecostos (Hortigüela Arozamena, 2022). Para compensar la incertidumbre, los tiempos de las actividades están sobredimensionados, añadiendo un tiempo de seguridad a la duración de las tareas. Uno de los principales elementos de CCPM es eliminar ese tiempo de seguridad y acumularlo en forma de buffers situados al final de una secuencia o cadena de tareas (Fuentes et al., 2019).

Por ello el seguimiento del proyecto se centra en conseguir que el éste en su conjunto finalice en el plazo estimado, y no cada tarea de forma individual. Debido a este carácter no determinista, esta metodología exige haber definido la duración de las tareas con su

valor más probable y su variabilidad, de tal forma que la duración de cada tarea estará representada por una distribución normal.

Según González Sajiúm & De La Rosa (2019), el método de la cadena crítica supera las limitaciones del método de la ruta crítica CPM, pues tiene en cuenta el incorrecto manejo de la incertidumbre que hace que la mayoría de los proyectos no se terminen en el tiempo y con el costo esperado y con la calidad deseada. Una demora en la disponibilidad de los recursos puede retrasar un programa, tanto como un incumplimiento en las tareas pendientes

## **Diagrama de Gantt**

Los diagramas de Gantt son diagramas de barras horizontales que determinan las actividades de un proyecto, las cuales son monitoreadas en función de un cronograma establecido. Tanto el método de la ruta crítica y los diagramas de Gantt muestran las dependencias entre las tareas (Asana, 2021b).

Es un gráfico de barras horizontales que se usa para ilustrar el cronograma de un proyecto, a partir de un sistema de coordenadas en que se indica en el eje Horizontal: un calendario, o escala de tiempo definido en términos de la unidad más adecuada al trabajo que se va a ejecutar: hora, día, semana, mes, etc. En el eje Vertical: Las actividades que constituyen el trabajo a ejecutar (Pérez Castañeira et al., 2021, p.111-112). A cada actividad se hace corresponder una línea horizontal cuya longitud es proporcional a su duración en la cual la medición se efectúa con relación a la escala definida en el eje horizontal.

Los diagramas de Gantt se pueden combinar con la ruta crítica para hacer un seguimiento de las rutas críticas a lo largo del tiempo y así mantener los proyectos encaminados hacia el cumplimiento de los objetivos propuestos.

### 3.2.2. Metodologías y métodos del enfoque Ágil.

La metodología ágil es uno de los procesos de gestión de proyectos más comunes en el momento, aplicada a diferentes industrias, incluida la construcción. Pero lo cierto es que técnicamente no es una metodología, sino que se define mejor como un principio de gestión de proyectos. Es el conjunto de buenos valores y buenas prácticas para el desarrollo de proyectos (Asana, 2021b), aplicando estructuras que define pasos a seguir con entregas parciales, roles claros del equipo de trabajo, optimización de tiempo y recursos y desarrollo por iteraciones, con el fin de obtener claridad total sobre lo que el cliente espera, para poder entregar un producto final lo más cercano a lo deseado.

Dentro de estas metodologías de gestión de proyectos se encuentran las siguientes:

#### **Scrum:**

Es un marco de trabajo basada en control de procesos a través del empirismo, donde se debe asegurar que el conocimiento siempre parte de la experiencia y en la toma de decisiones teniendo como base aquello que se conoce de forma previa (Aguirre Barrera & Aguirre Barrera, 2020).

Se basa en “sprints” (ciclos de ejecución muy cortos, entre una y cuatro semanas) que se usan para crear un ciclo de proyecto. Aguirre Barrera & Aguirre Barrera, (2020) Expresan que tal vez es una de las ramas más utilizadas para la aplicación de la metodología ágil. Es un marco de trabajo por el cual las personas pueden abordar problemas complejos y adaptarlos para entregar productos del máximo valor posible de forma productiva y creativa. Scrum emplea un enfoque iterativo e incremental que permite optimizar la predictibilidad y controlar el riesgo.

La implementación de la teoría de Scrum se basa en los pilares: *Transparencia*, son los aspectos significativos del proceso los cuales deben ser visibles para aquellos que son responsables del resultado. *Inspección*, los usuarios del Scrum son los encargados de

inspeccionar constantemente los instrumentos del mismo y el progreso hacia el objetivo, lo que permite identificar variaciones. *Adaptación*, consiste en ajustar el proceso cuando en la actividad anterior se detectan uno o más aspectos desviados de los límites aceptables y que el producto resultante será aceptable (Satpathy, 2017).

## **Kanban:**

Es una metodología ágil y flexible usada para la gestión de proyectos, esta metodología visualiza mejor los flujos de trabajo (comparada con las metodologías tradicionales) de forma gráfica en un tablero donde se puede ver en conjunto las actividades en proceso, lo cual permite identificar y comprender el proceso y aprovechar las posibles oportunidades de mejora (Calvo, 2018).

Kanban como Scrum visualizan el flujo de trabajo de un equipo y las tareas del proyecto planificadas, en proceso y completadas mediante el uso de un tablero físico o digital de acuerdo a como lo muestra la figura 3-5, donde hay un tablero con 4 columnas: en la primera se establece las entradas las cuales se clasifican según la prioridad, en la segunda el Trabajo Pendiente, en la tercera el Trabajo en Proceso y en la cuarta están finalmente, las Tareas Terminadas.

La metodología Kanban es susceptible de ser mejorada. En su investigación (Weflen et al., 2022) presenta un modelo matemático basado en la teoría de Bayes y las probabilidades condicionales, para crear un modelo explicable y ayudar a los equipos de Kanban a proporcionar una estimación precisa de cuándo comenzaría el trabajo en una tarea pendiente específica al tener en cuenta factores como el rendimiento del equipo, el tamaño de las tareas y el movimiento en la cartera de pedidos, el cual emplea un modelo gráfico conocido como diagrama de influencia

**Figura 3-5:** Metodología Kanban

<b>TABLERO KANBAN</b>			
ENTRADAS	Trabajo Pendiente	Trabajo en proceso	Tareas Terminadas
Urgente			
Prioridad normal			
No es crítica			
Baja prioridad			

Fuente: Elaboración propia

Dadas sus características, esta metodología puede ser complementaria a otras como scrum, al punto que existe una propuesta híbrida denominada SCRUMBAN.

### Lean:

Tiene como objetivo optimizar los procesos y crear un marco simple para cumplir con las necesidades del proyecto. Significa lograr más con menos esfuerzo para maximizar la eficiencia y el trabajo en equipo. Es una disciplina que tiene como finalidad proveer la mayor cantidad de información posible y así facilitar la toma de decisiones a favor de la satisfacción del cliente. Esta disciplina toma como base dos conceptos importantes como lo consideran Rodríguez et al. (2019):

- **Mejoramiento continuo:** Crear grupos de trabajo que aprenden constantemente y que mejoran los procesos.
- **Respeto por los demás:** Lean les permite a los integrantes del equipo de trabajo tener las mismas condiciones en todas las fases del proyecto, lo cual ubica la voz del cliente como el centro de la estrategia del producto.

En consecuencia, el modelo de Lean tiene como fin responder a los cambios del mercado y satisfacer las demandas del consumidor utilizando el mínimo de recursos posibles, por lo que esta es una metodología que se emplea para realizar un trabajo colaborativo que implica un compromiso entre los participantes que no solo están intentando ejecutar bien su trabajo, sino que también están apoyando el éxito de los demás para cumplir los objetivos generales del proyecto.

### **3.2.3. Metodologías y métodos del enfoque híbrido**

Su objetivo principal es realizar una gestión e implementación más flexible orientada a los resultados del proyecto y necesidades del cliente, buscando reducir tiempos de ejecución.

Consiste en combinar los mejores métodos de las metodologías tradicionales y ágiles que ya fueron mencionadas, para ser implementadas en entornos donde el tiempo de ejecución es reducido y flexible, y donde se requiere que el servicio o producto final esté disponible rápidamente.

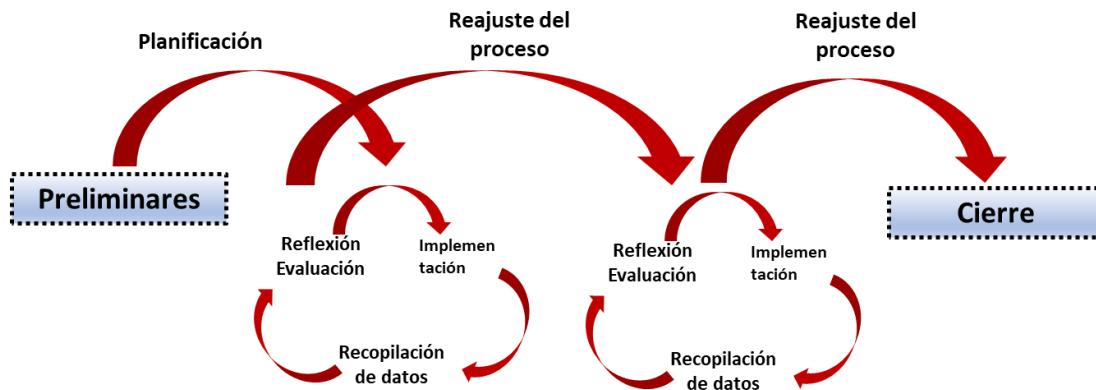
Dentro de estas metodologías se encuentran las siguientes aplicadas a la industria de la construcción:

#### **Iterativa:**

Esta metodología consiste en el chequeo y retroalimentación constante del modelo a construir, aunque éste no esté finalizado, lo que permite dinamizar los requisitos de tal forma que se puedan modificar a lo largo del proyecto. Adicionalmente, la metodología permite realizar entregas parciales del modelo (Poza, 2018), como lo son los diferentes diseños que se deben integrar de manera conjunta en un modelo 3D permitiendo visualizar posibles colisiones entre sistemas constructivos, lo cual ayuda a realizar los ajustes a los mismos y establecer diferentes opciones en el diseño de ejecución para poder definir el proceso constructivo más óptimo, que es lo que lo permite optimizar el tiempo y los costos en la construcción, generando así valor agregado a cada proceso.

El patrón de trabajo utilizado en esta metodología se basa en iteraciones que a su vez se componen de actividades secuenciales de planificación, desarrollo, reajustes del proceso, pruebas y entregas parciales como se muestra en la figura 3-6 (Poza, 2018).

**Figura 3-6:** Metodología Iterativa



Fuente: Adaptado de (Poza, 2018).

Aguirre Barrera & Aguirre Barrera, (2020) mencionan en su trabajo que una de las principales ventajas de esta metodología sobre otras, es que permite reducir el riesgo por mala comunicación entre las necesidades del cliente y el constructor debido a que es posible evaluar constantemente los resultados obtenidos y detectar a tiempo posibles fallas en la ejecución del proyecto. Adicionalmente, no es necesario que los requisitos estén definidos totalmente al inicio, lo que permite que en cada iteración el cliente evalúe la entrega y se pueden hacer mejoras o correcciones hasta obtener el producto deseado. Pero, esto también puede asumirse como una desventaja en caso de que el cliente no tenga claro lo que desea pues puede afectar la arquitectura del proyecto.

### **Incremental:**

En esta metodología se acogen algunas técnicas utilizadas en la metodología cascada y en la metodología iterativa ya que se realizan entregas parciales, pero en cada una de

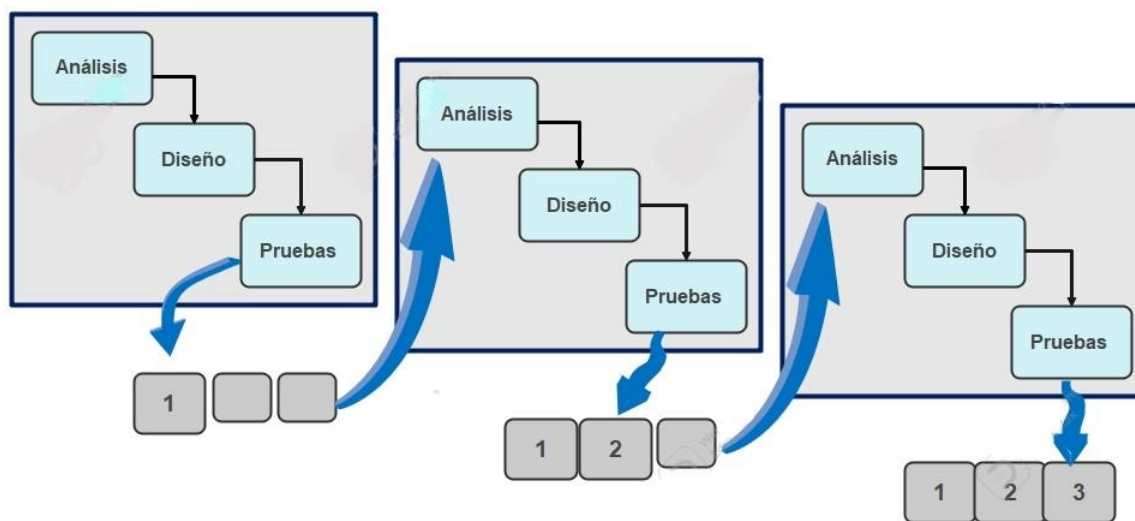


estas se entrega el producto con nuevas capacidades, es decir, se incrementa su funcionalidad.

Son métodos pensados para incorporar el cambio. Así mismo, se debe mencionar que la duración de cada iteración puede ser de semanas o meses, esto depende de la naturaleza del proyecto (Poza, 2018).

El alcance del proyecto no se define al inicio de éste, sino en cada iteración, lo que facilita los cambios a medida que se va desarrollando el proyecto. En la figura 3-7 se observa cómo se realizan las iteraciones (análisis, diseño y pruebas) de manera incremental hasta llegar a el producto deseado.

**Figura 3-7:** Metodología Incremental



Fuente: Elaboración propia

## Building Information Modeling (BIM)

El comité Americano del Proyecto Estándar del Modelo de Información Nacional, define BIM como la representación digital de las características físicas de una instalación. Es una metodología de trabajo colaborativa y en tiempo real para la gestión de proyectos constructivos. Facilita la comunicación entre las partes, optimizando los flujos de trabajo y

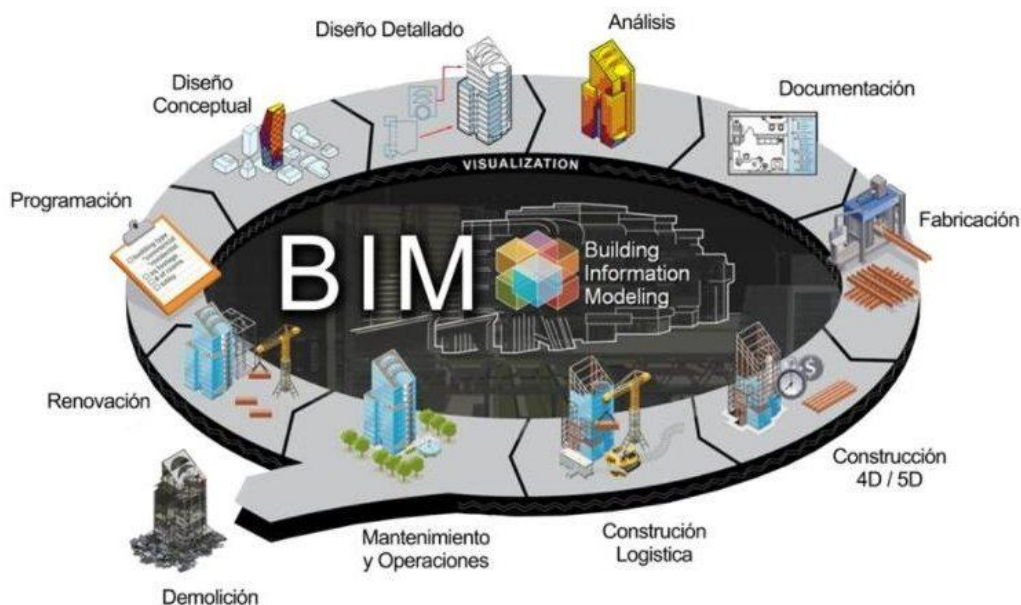
permite prever y solucionar problemas constructivos de manera anticipada. BIM no se refiere específicamente a un determinado software, sino a un planteamiento industrial en el que la tecnología y el software de gestión son sólo su plataforma de aplicación, utilizando una interfaz visual para introducir en el ordenador la información de los distintos componentes del edificio y, posteriormente, el ordenador permite calcular, analizar y generar despliegues, recuentos y mediciones directamente desde el modelo integrado y sincronizado, con lo cual, se obtiene una cuantificación precisa y automatizada.

Además, ayuda a reducir significativamente la incertidumbre en las estimaciones de los costos. Lo que significa un beneficio importante para la industria, en términos de productividad, disminución de esfuerzos, de costos y demás (Muñoz García, 2020) y ofrece de forma intuitiva a los diseñadores datos relevantes en las distintas fases de diseño, construcción y mantenimiento (Zhang & Liu, 2021).

El uso de software paramétricos que hacen parte de la metodología BIM, han impactado sobre los procesos comunicativos, desde el hecho de poder centralizar la información y tener una fuente común de datos para todos los actores en el proceso de diseño (Muñoz García, 2020), además, ha proporcionado la infraestructura necesaria para adoptar nuevos flujos de trabajo iterativos, incluida la gestión ágil en general (M. Sakikhales, 2022). Los softwares permiten generar y gestionar información mediante modelos a lo largo del ciclo de vida del proyecto y en combinación con las metodologías tradicional o ágil, permiten compartir esta información de manera estructurada e iterativa entre todos los actores involucrados, fomentando el trabajo colaborativo e interdisciplinario.

A diferencia de los métodos tradicionales de desarrollo de un proyecto de edificación, la metodología BIM y el intercambio fluido de información de ésta, con los diferentes actores involucrados a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto de forma cíclica e interactiva, indica que la fase de diseño como procesos de trabajo no funciona de manera independiente y lineal, tal como lo muestra la figura 3-8 donde se puede evidenciar las diferentes fases del proyecto y el relacionamiento de los diferentes actores entre sí y con el proyecto mismo .

**Figura 3-8:** Metodología BIM



Fuente: Tomado de <https://forums.autodesk.com/t5/revit-bim-360-espanol/el-bim-en-colombia/td-p/5629133>

## Matriz de estructura de dependencia (DSM Dependency Structure Matrix)

DSM ha sido identificada como una herramienta para planificar las secuencias de actividades y también para identificar y administrar los intercambios de información.

La representación básica del DSM es una matriz cuadrada que contiene una lista de actividades en las filas y columnas en el mismo orden en forma de matriz. El orden de las actividades en las filas o columnas de la matriz indica la secuencia de ejecución. La relación entre las actividades se representa con una marca 'X' en las celdas fuera de la diagonal. Las actividades deben leerse a lo largo de la columna como “da información a” y a lo largo de la fila como “necesita información de” (Maheswari, 2005). Sin embargo, cada uno de estos tipos de interacciones podría representarse en un diagrama de flujo u otra representación de simulación de procesos, ciertos patrones suelen pasar desapercibidos y sin documentar en dichos diagramas (En especial los subconjuntos de actividades acopladas).

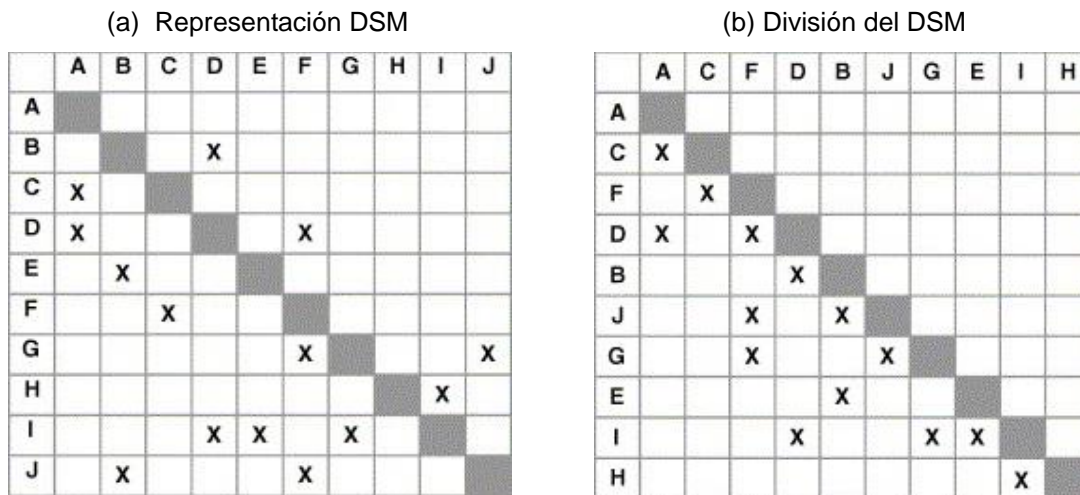
Eppinger & Browning, (2018), han mencionado en su investigación que:

Las herramientas más comunes de simulación y análisis de procesos el diagrama de flujo de la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (PERT), el Método del Camino Crítico (CPM) y sus diagramas de Gantt asociados, no representan bien los procesos cíclicos ni muestran grupos de actividades acopladas.

Como resultado de la falencia anteriormente mencionada, DSM surgió para superar las limitaciones de los métodos basados en gráficos y puede modelar iteraciones en cualquier entidad individual.

La figura 3-9 muestra la secuencia de actividades mediante DSM. La Fig. 3-9(a) captura la representación de la DSM y la Fig. 3-9(b) muestra las filas y columnas reordenadas indicando la secuencia de ejecución factible luego de hacer un reordenamiento de las actividades de acuerdo a iteración requerida.

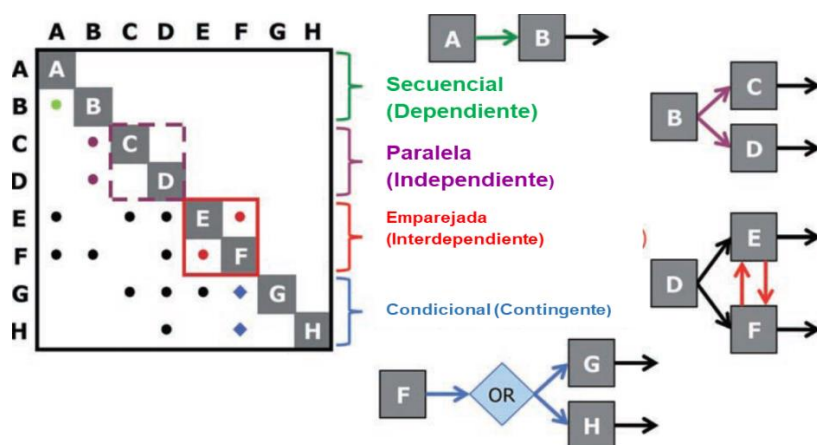
**Figura 3-9:** Representación de la secuencia de actividades mediante DSM.



Fuente: Tomado de (Maheswari & Varghese, 2005)

La figura 3-10 ilustra cómo se utiliza el proceso DSM para representar las interacciones entre las actividades. Se incluyen las cuatro relaciones fundamentales que se dan entre actividades.

**Figura 3-10:** Relaciones de actividad secuenciales, paralelas, acopladas y condicionales en el proceso DSM



Fuente: Adaptado de (Eppinger & Browning, 2018)

## Matriz de dominio múltiple (MDM)

La matriz de dominio múltiple (MDM) es una poderosa metodología emergente para capturar iteraciones en múltiples entidades (Maheswari et al., 2019), que evolucionó a partir de la DSM.

MDM permite capturar los intercambios de información a través de dominios y múltiples entidades de un proceso de diseño. MDM es percibida como una biblioteca de información que tienen su origen en cualquier momento durante el desarrollo de proyectos entre los equipos de diseño, componentes, actividades o parámetros (Mujumdar & Maheswari, 2018).

Esta metodología apoya a los planificadores de proyectos a crear un cronograma ajustado, que sea más apropiado en comparación con los cronogramas según lo planificado o según lo construido (Singhal et al., 2018). Adicionalmente, permite integrar las interacciones entre los diferentes actores del proyecto, que se pueden involucrar si se identifican los roles y asignación a los procesos de manera previa, apoyado en el uso de una matriz RACI (Responsible Accountable Consulted Informed matrix), para establecer cadena de valor en términos de comunicación e información (Rua-Machado et al., 2022).

## Objetivos parciales

El último planificador, Last Planner System® (LPS) es un sistema de control que mejora el cumplimiento de actividades y la correcta utilización de recursos de los proyectos de construcción. Desarrollado por Glen Ballard y Lauri Koskela, fundadores del Lean Construction Institute. Su principio básico se basa en aumentar el cumplimiento de las actividades de construcción mediante la disminución de la incertidumbre asociada a la planificación. Consiste en crear planificaciones intermedias y semanales de forma colaborativa, enmarcadas dentro de la programación inicial o plan maestro del proyecto, analizando las restricciones que impiden el normal desarrollo de las actividades (Lean Construction Enterprise, n.d.).

También se puede decir que es un proceso de planificación cíclica que ayuda al equipo a comprender mejor cómo diseñar el flujo de trabajo en función de las interdependencias, las cadenas de suministro, la logística y todos los demás factores que puedan condicionar el trabajo. Como resultado, cada actor (incluyendo el propietario) puede ver cómo el alcance del proyecto, las decisiones y demás aspectos, pueden afectar la programación y su control. Los responsables de las diferentes actividades han de comprometerse a unas mediciones o unidades a entregar. (León Daza, 2020)

Un paso clave en la implementación del LPS, es llevar un registro detallado de los problemas que se presentan para cumplir las actividades planeadas. Para esto, se construye semanalmente el indicador de porcentaje de actividades cumplidas (PAC) el cual se calcula con la siguiente ecuación.

$$\text{PAC} = \frac{\text{Número de actividades cumplidas}}{\text{Número de actividades programadas}} \times 100\%$$

El PAC se puede calcular para el total de actividades de una semana en particular o para el total de actividades ejecutadas en un período que puede ser tan largo como el total del plazo de construcción. Este indicador sirve para llevar un control de la evolución de la

implementación del sistema, junto con la información de las causas de no cumplimiento constituyen una herramienta útil para el planeamiento de actividades intermedias y semanales (Lean Construction Enterprise, n.d.).

### **3.2.4. Metodologías y métodos de Tecnología de Información**

Este grupo de metodologías y métodos debería circunscribirse dentro de las metodologías híbridas ya mencionadas, pero su potencial en el direccionamiento que están brindando hacia la digitalización de la construcción permite aumentos sustanciales en la automatización, el rendimiento y la confiabilidad en la gestión de proyectos (Manzoor et al., 2021), además, motivan a que en esta investigación se clasifiquen en un grupo independiente para conocer los aportes que brindan al diseño de ejecución de la industria de la construcción.

## **Inteligencia artificial IA**

La Inteligencia Artificial (IA) es la tecnología que permite entrenar a las máquinas para imitar funciones cognitivas humanas. Es capaz de detectar patrones, aprender a partir de la experiencia y comprender datos e imágenes, ésta tiene el poder de impactar a toda la cadena de valor, desde la producción de materiales de construcción, el diseño, la planificación y el desarrollo, hasta la gestión de proyectos. Puede almacenar y procesar cantidades ilimitadas de datos y aprender de ellos. Esto es posible gracias a su componente llamado aprendizaje automático, que utiliza los datos que recopila y los testea con un método de prueba y error para sugerir mejoras (Sayol, 2021) y establecer diferentes diseños de ejecución de un proyecto y seleccionar aquellos escenarios de ejecución más óptimos, tanto por tiempo, costo o nivel de seguridad.

La inteligencia artificial juega un papel importante en la industria de la construcción, permitiendo mejoras del rendimiento como también la conectividad entre la construcción física y digital (Manzoor et al., 2021).

Según menciona Sayol, (2021), la Inteligencia artificial tiene los siguientes ámbitos de aplicación en la industria de la construcción:

- Gestión de proyectos: asignación de tareas y diseño de flujos de trabajo.
- Construcción inteligente: a partir de la oportunidad de recopilar datos y relacionar dichos datos con BIM, lo cual permite realizar propuestas de diseño inteligentes y tomar mejores decisiones en lo que respecta a la planificación.
- Diseño generativo: es un proceso de diseño iterativo que involucra un programa que produce un cierto número de opciones que cumplen con parámetros establecidos. Tiene la capacidad para explorar variaciones diferentes de un modelo y encontrar la mejor opción. El diseñador afina las especificaciones seleccionando una alternativa o ajustando los valores de entrada, los rangos y la distribución. El software de diseño generativo crea modelos 3D optimizados para las restricciones, aprendiendo de cada iteración hasta llegar al modelo ideal.

Existen diversas formas de aplicar la inteligencia artificial en la construcción. Una de ellas son las redes neuronales. Su aplicación en gestión de proyectos genera impacto en la planificación y desarrollo de diseños y diseño de ejecución:

## **Redes neuronales**

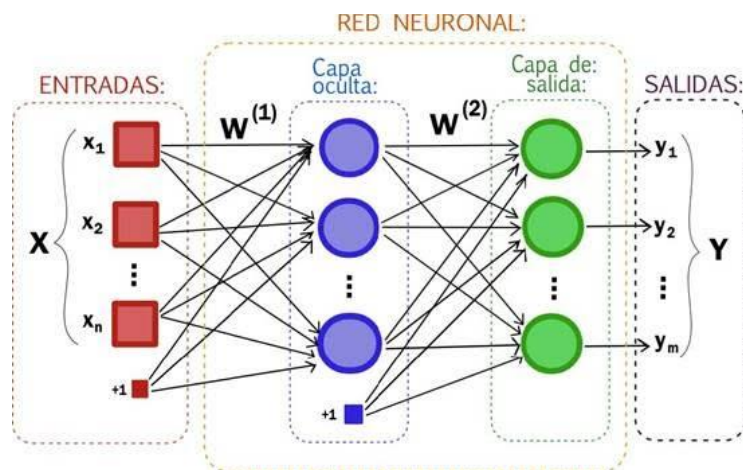
Una red neuronal es un modelo simplificado que emula el modo en que el cerebro humano procesa la información. Son sistemas de procesamiento de la información que consisten en un gran número de elementos simples de procesamiento que están organizados en capas. Cada neurona está conectada con otras neuronas mediante enlaces de comunicación, y pueden aprender a llevar a cabo diferentes tareas (Vitorino Bravo, 2020).

Hay tres componentes normalmente en una red neuronal lo cual se ilustra en la figura 3-12: una capa de entrada, con unidades que representan los campos de entrada; una o varias capas ocultas; y una capa de salida, con una unidad o unidades que representa el campo o los campos de destino. Las unidades se conectan con fuerzas de conexión



variables (o ponderaciones). Los datos de entrada se presentan en la primera capa, y los valores se propagan desde cada neurona hasta las otras neuronas de la capa siguiente. Al final, se envía un resultado desde la capa de salida (IBM, 2021).

**Figura 3-11:** Redes neuronales



Fuente: Tomado de <https://sites.google.com/site/mayinteligenciartificial/unidad-4-redes-neuronales>

La red aprende examinando los registros individuales, generando una predicción para cada registro y realizando ajustes a las ponderaciones cuando realiza una predicción incorrecta, este proceso se repite las veces que sea necesario y la red sigue mejorando sus predicciones hasta haber alcanzado uno o varios criterios de parada (IBM, 2021).

Estos modelos, se pueden utilizar en los diferentes proyectos para predecir sobrecostos en función de factores como el tamaño, el tipo de contrato y el nivel de competencia de los administradores. También, los modelos predictivos pueden usar datos históricos, como las fechas de inicio y finalización planificadas, para estimar plazos realistas en proyectos futuros (Irwin Lazar, 2022).

## Simulación de eventos discretos

La simulación de eventos discretos (DES) es una herramienta estocástica que se puede utilizar para analizar los procesos de construcción, se centra en el propio proceso y lo modela. La simulación de eventos discretos se basa en el concepto de entidades y recursos para describir su flujo y reparto en un sistema (Bokor et al., 2019)

Moradi et al. (2017) considera el proyecto como una colección de procesos de construcción; así, al proporcionar información operativa detallada y eficiente, las operaciones repetitivas estarían representadas en un único proceso estructurado.

## **Dinámica de sistemas**

Tal como lo definen De Leo et al. (2020), la dinámica de sistemas (SD) es una metodología basada en el pensamiento sistémico que permite abordar situaciones complejas, aplicando la observación del todo y la relación con cada una de sus partes, a diferencia del método analítico que hace todo lo contrario, es decir, analiza las partes del sistema sin observar las relaciones entre ellas. Es una metodología descendente que se centra en los diversos factores que influyen en las relaciones entre ellos para mostrar el funcionamiento y el comportamiento de todo el sistema con bucles de retroalimentación (Bokor et al., 2019).

Dentro de la Gestión de Procesos un modelo de Dinámica de Sistemas permite simular la estructura de cada proceso y realizar análisis de sensibilidad de sus diferentes fases. La puesta en marcha de un nuevo proceso presenta con frecuencia muchos imprevistos, que son difíciles de corregir durante la aplicación porque cualquier cambio influye en otras partes del proceso. Un modelo de simulación de Dinámica de Sistemas ayuda a identificar el impacto de pequeñas variaciones aleatorias en la evolución general del proceso (García, 2006).

## **Modelado basado en agentes**

El modelado basado en agentes (ABM) es una metodología de simulación computacional

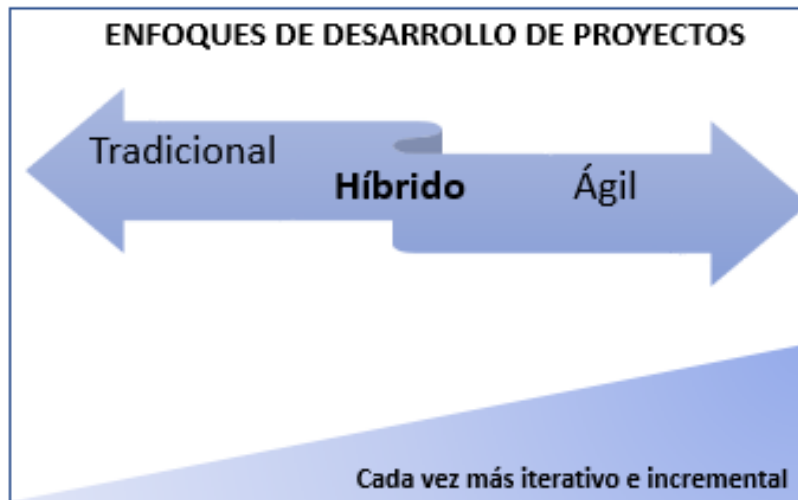
que crea un entorno común para que lo compartan agentes heterogéneos y autónomos, y permite que los agentes interactúen simultáneamente entre sí por interés propio. A diferencia de los enfoques de modelado de arriba hacia abajo, que incluyen la dinámica de sistemas (SD) y la simulación de eventos discretos (DES), en AMB el comportamiento colectivo del sistema simulado no está predefinido, sino que surge de agentes individuales que actúan en función de lo que perciben como sus propios intereses (Du et al., 2016), entre los cuales podrían encontrarse los dueños de los proyectos u otros actores con un grado de injerencia en el proyecto.

Las interacciones o comunicaciones entre los agentes se realizan de acuerdo a un conjunto de “reglas” predefinidas. Las reglas que rigen el comportamiento de los agentes individuales influyen en los resultados/predicciones de ABM; por lo tanto, es necesario acoplar estrechamente todos los algoritmos basados en reglas en todas las etapas del desarrollo del modelo (Ding et al., 2018).

### **3.3. Discusión**

Para definir el enfoque del proyecto se debe tener en cuenta los objetivos del mismo y considerar la eficiencia que se espera del desarrollo de éste, esto ayuda a adoptar una metodología que coincida con un objetivo. No todas las metodologías se adaptan a los proyectos, por lo que se hace necesario conocer las características de cada una de ellas, para seleccionar la más adecuada, y conferirle al equipo de trabajo el método que mejor se adapte para conseguir la mayor eficiencia posibles y obtener los resultados esperados.

En función a lo mencionado anteriormente, es importante identificar las ventajas y desventajas más representativas de cada metodología para así tener claro cuál es la que mejor se adapta al proyecto que se va a desarrollar, según el grado de iteración que se requiera de acuerdo a como se evidencia en la figura 3-12.

**Figura 3-12:** Enfoques de desarrollo de proyectos

Fuente: Elaboración propia

La figura 3-12 muestra los enfoques de desarrollo de proyectos, siendo el enfoque ágil el más iterativo e incremental, el enfoque tradicional el menor y el enfoque híbrido se ubica en un punto intermedio.

Si comparamos las metodologías más comunes en la industria de la construcción, en las que se encuentra la de cascada y lean, la primera tiene como ventaja que su implementación es fácil ya que cuenta con una secuencia lógica y cada fase cuenta con un entregable, lo que permite realizar una verificación sencilla, no obstante, se considera una metodología no apta para proyectos de gran tamaño y complejos. La segunda, tiene a favor que permite obtener una retroalimentación rápida sobre las mejoras que se deban realizar, debido a que el cliente es parte del equipo de trabajo, además, cuenta con ciclos simples y fáciles de entender, pues el proyecto se divide en paquetes de trabajo; pero puede ser sensible a cambios constantes debido a la dependencia de las personas y falta de documentación.

Cada metodología ofrece principios únicos que permiten gestionar un proyecto de construcción desde el plan inicial hasta su ejecución final. Por lo tanto, se deben considerar

algunos aspectos del proyecto como el tamaño del equipo y cómo se va a trabajar. para lo cual se debe tener en cuenta: los objetivos del proyecto, su complejidad, grado de especialización de los roles y el tamaño de las empresas:

Es necesario tener en cuenta si el proyecto está inmerso en un sector que cambia con frecuencia, por ejemplo, una empresa de construcción que se dedique a construir edificaciones a medida del cliente sin un alcance definido totalmente, es un proyecto en constante evolución. Esto influirá en la consistencia del proyecto y se debe analizar si se trabaja con enfoques ágiles o híbridas.

Los proyectos suelen ser sencillos o complejos. Algunos métodos no son tan efectivos como otros cuando se trata de organizar tareas complejas, como la metodología de gestión de proyectos por cadena crítica.

El grado de especialización de los roles es vital, ya que debe considerar la función que cumple cada rol en el equipo de trabajo. Puede ser posible que varios miembros del equipo realicen el mismo tipo de tarea de manera alternada o se requiere implementar un método que tenga en cuenta el nivel de especialización de cada empleado para tal caso se debe recurrir al desarrollo de una matriz RACI.

El tamaño de la empresa y del equipo es importante tenerlo en cuenta al momento de elegir una metodología. Los métodos como Kanban son ideales para equipos de todos los tamaños, mientras que las opciones como CPM son más adecuadas para equipos pequeños.

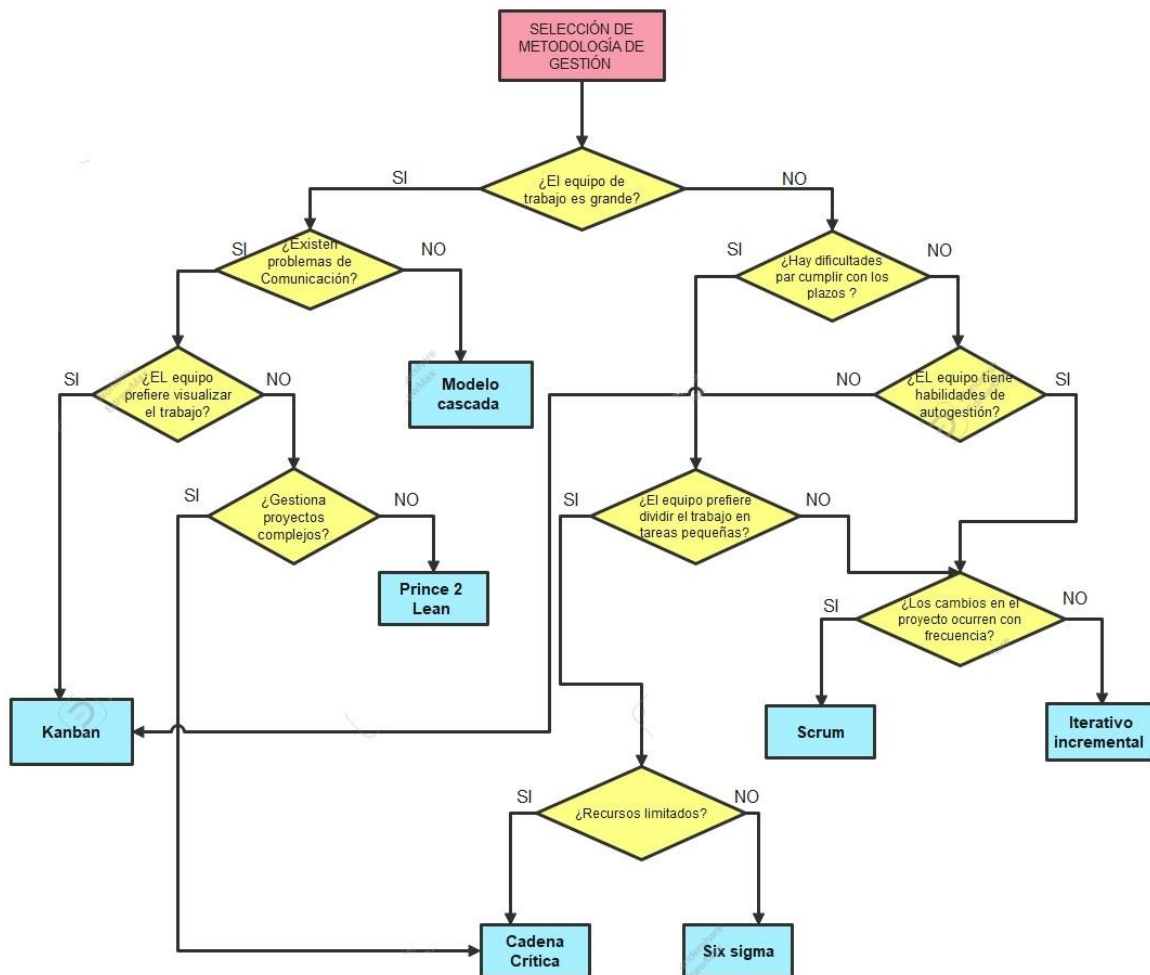
La planificación de la construcción es una tarea intensiva en conocimientos en la que los planificadores acumulan datos de diferentes fuentes y en varios formatos, visualizan un proceso para realizar el proyecto y comunican esa visión a las diferentes partes

interesadas del proyecto en forma de un cronograma. La gran cantidad de datos y la dependencia de actividades en forma de restricciones estructurales, hacen que la planificación de proyectos grandes sea complicada.

Es importante definir las variables de trabajo para la elaboración de modelos o diseño de ejecución en la industria de la construcción, con el propósito de optimizar el diseño de ejecución a través de la integración de diferentes metodologías y herramientas de software que permitan tomar decisiones acertadas y oportunas tanto durante la fase de diseño del proyecto, como en la ejecución a partir de iteraciones que sean necesarias.

La figura 3-13 sugiere una guía para definir algunos de las metodologías de gestión, según las características del proyecto.

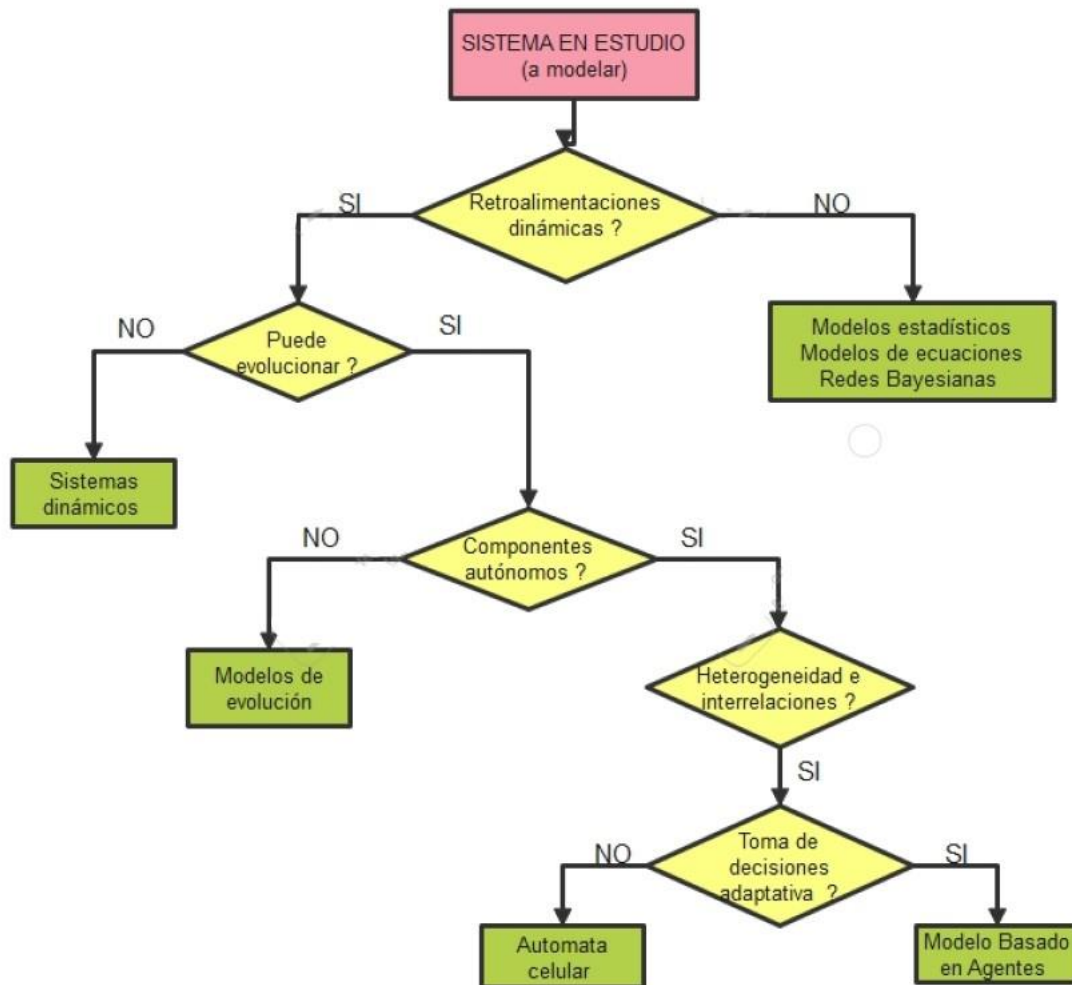
**Figura 3-13:** Árbol de decisiones para definir metodologías de gestión



Fuente: Elaboración propia

La figura 3-14 sugiere una guía para definir algunos de los modelos/herramientas más apropiados a emplear de las metodologías de tecnología de la información, según las características del sistema en estudio.

**Figura 3-14:** Árbol de decisiones para definir modelos / herramientas de sistemas complejos



Fuente: Adaptado de (Heckbert et al., 2010)



## **4. Categorización de las herramientas en función de la eficiencia en los sistemas de gestión de diseño y diseño de ejecución.**

Como resultado de la identificación de las metodologías y herramientas de gestión para el diseño y diseño de ejecución en la construcción, es importante conocer cómo se han aplicado las mismas en la industria a nivel global, para lo cual, esta investigación realizó una revisión en 3 etapas sobre 103 artículos de revistas publicados entre 2001 y 2022. Los análisis bibliométricos y de contenido presentan métricas sobre publicaciones, revistas y autores junto con la categorización de estudios de investigación. Un análisis integrado combina los dos análisis anteriores para presentar una discusión sobre la evolución y las tendencias de la investigación y los posibles temas a desarrollar a futuro.

Esta investigación puede contribuir al desarrollo de nuevo conocimiento a partir de: 1) una perspectiva teórica al familiarizar a los investigadores con el diseño de ejecución dentro del contexto de la construcción, desde un punto de vista de la fase del proyecto que se implemente. 2) una perspectiva práctica mediante la revisión de estudios orientados a la industria y brindando recomendaciones para establecer parámetros de desarrollo de herramientas de gestión de proyectos y su ejecución.

### **4.1. Búsqueda de la literatura.**

Para obtener artículos referentes al tema, se implementó una metodología sistemática mediante búsqueda por palabra clave de la siguiente manera:

- a. Campos de título, resumen y palabras clave.
- b. La búsqueda se restringió a artículos clasificados como 'Tipo de artículo'.
- c. El algoritmo de búsqueda empleado se definió con los siguientes criterios: "construction simulation" AND "project" OR "management" OR "methodologies" OR "iteration". Se dejan alertas en Scopus para identificar documentos de publicación recientes.

- d. Se revisaron los resúmenes para verificar la idoneidad de los artículos recopilados con los objetivos de la investigación, limitando la selección a documentos que incluyeron discusiones sobre metodologías de simulación de construcción.

Se tuvieron en cuenta artículos relacionados con simulación de la construcción (diseño de ejecución) en lugar de documentos que estudian otras industrias como la tecnología de la información (TI) y la manufactura.

Scopus fue seleccionado como la principal base de datos para buscar artículos académicos. Se conoce que esta base de datos cubre la mayoría de las revistas y conferencias líderes en el campo de la simulación. También se utilizó los buscadores, ScienceDirect y Google Scholar para realizar búsquedas manuales en los perfiles de los autores con el fin de incluir algunos otros artículos relevantes que no se circunscribieron en los resultados de la búsqueda en la base de datos Scopus.

Otro de los criterios de búsqueda fue la fecha de publicación para el período posterior al año 2000. La razón principal para establecer este período de búsqueda es que las metodologías de gestión y herramientas de investigación de simulación de la construcción o diseño de ejecución, según lo informado por AbouRizk (2010), comenzó después de 2000.

El proceso de selección manual incluye la eliminación de duplicados, documentos irrelevantes y artículos que no estén en inglés, de modo que solo queden artículos de revistas científicas revisadas por pares y tesis que presentan investigaciones desarrolladas de manera estructurada.

## **4.2. Análisis de literatura**

La búsqueda en la base de datos de Scopus arrojó como resultado 123 artículos, de los cuales se hizo una selección utilizando una técnica de lectura superficial, obteniendo como

---

resultado 80 artículos a los cuales se adhieren 23 documentos seleccionados de ScienceDirect y Google Scholar. El análisis de contenido se realizó sobre el cuerpo de texto para identificar patrones de investigación actuales y conceptos emergentes.

La tabla 4-1 enumera las revistas con mayor número de publicaciones del total (103) de artículos identificados. El análisis bibliométrico de las revistas es útil para identificar las revistas líderes dentro de un campo, ya que el número de artículos publicados sobre un tema determinado puede ser una premisa adecuada para la alineación del alcance de una revista con el tema. Las 103 publicaciones seleccionadas en este estudio se recopilaron de 40 revistas diferentes, de las cuales solo 20 publicaron más de un artículo. Como se muestra, "*Automation In Construction*" domina la lista, representando el 10,7 % (11 de 103) de todos los artículos publicados sobre el tema, seguido de "*Advances In Civil Engineering*", "*Journal Of Civil Engineering And Management*", "*Journal of Construction Engineering and Management*" y "*Applied Sciences Switzerland*", que representan el 7,8 %, 6,8 %, 5,8 % y 4,9 % de los artículos publicados, respectivamente. Las cinco revistas mencionadas constituyen el 35,9% (37 de 103) del total de artículos publicados.

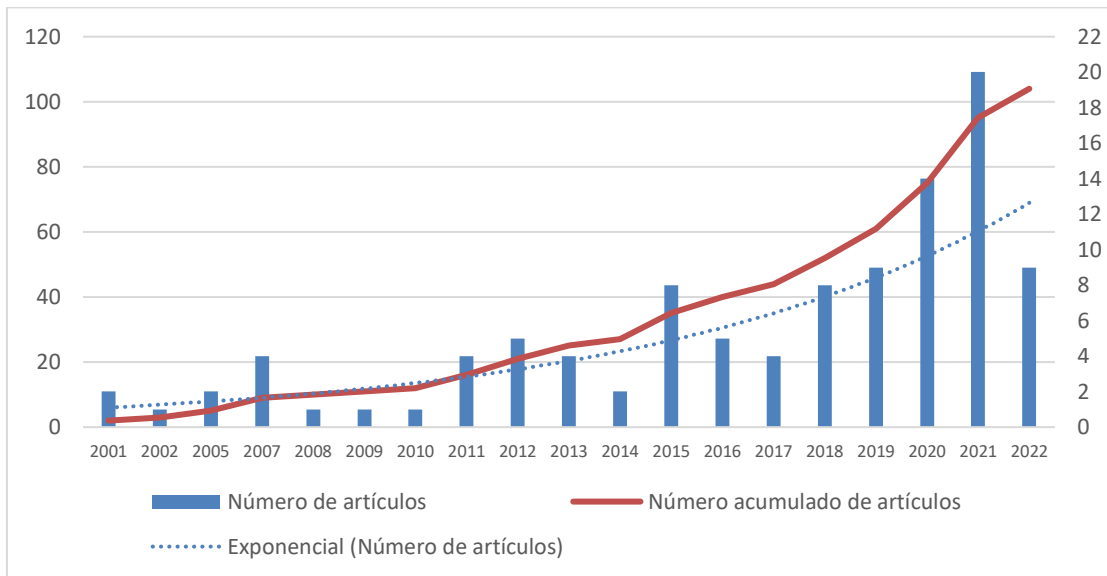
En la Figura 4-1 se observa la distribución de las publicaciones de los artículos consultados entre los años 2001 y 2022 en orden cronológico, además, muestra una tendencia creciente, con un aumento significativo en la cantidad de documentos en los últimos 4 años con un total de 50,5% de los artículos seleccionados para el análisis bibliométrico. Es importante mencionar que la cantidad de publicaciones en el año 2022 no es completa, pues los conjuntos de datos recuperados solo cubren los primeros 5 meses del año, sin embargo, la cantidad de artículos publicados para 2022 sigue la misma tendencia que la del año anterior. El aumento en el número de publicaciones en los últimos años apunta a que la simulación de la construcción es un área prometedora para futuras investigaciones e indica su aplicabilidad a varios problemas de investigación relacionados con la construcción como una herramienta de investigación efectiva.

**Tabla 4-1:** Revistas con más publicaciones de los documentos seleccionados

PRINCIPALES REVISTAS CONSULTADAS	Cant. artículos
Automation In Construction	11
Advances In Civil Engineering	8
Journal Of Civil Engineering And Management	7
Journal Of Construction Engineering And Management	6
Applied Sciences Switzerland	5
Buildings	5
Energies	5
Journal Of Asian Architecture And Building Engineering	5
Alexandria Engineering Journal	4
Canadian Journal Of Civil Engineering	4
Construction Innovation	3
IEEE Access	3
Sensors Switzerland	3
Engineering Construction And Architectural Management	2
Engineering Journal	2
Journal Of Information Technology In Construction	2
Scientia Iranica	2
Tehnicki Vjesnik	2
Tunnelling And Underground Space Technology	2
Visualization In Engineering	2

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4-1:** Incremento del número de publicaciones desde el 2001 hasta el 2022.



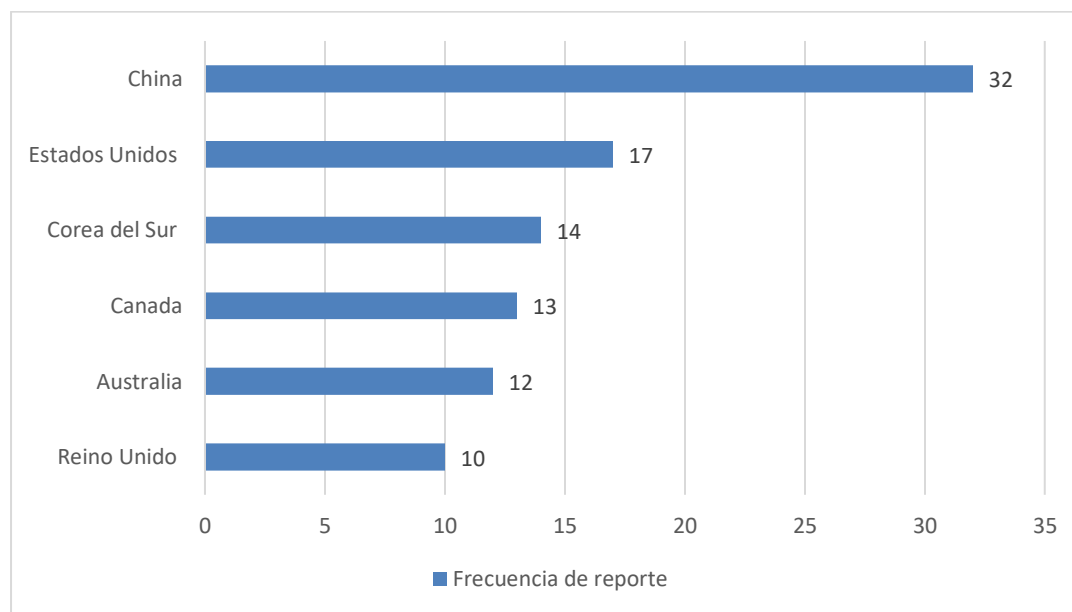
Fuente: Elaboración propia

Como consecuencia, los resultados de la figura 4-1 se asocian al desarrollo tecnológico por el que está pasando la industria de la construcción a nivel mundial, tratando de dejar

atrás el rezago que como industria se tiene frente a otras industrias como la manufacturera. La demanda en la construcción está aumentando; la escala de actores y proyectos está aumentando, haciendo más viable un nuevo sistema más productivo fundamentado en nuevas tecnologías, MGI (2017).

En la Figura 4-2 se observan las publicaciones distribuidas por país, en la cual se evidencia en primer lugar de investigaciones sobre simulación de la construcción o diseño de ejecución a China, lo cual refleja la imperante necesidad de la economía de un país por desarrollar investigación en temas relacionados al mejoramiento de la productividad, pues ha tenido un rápido crecimiento económico de más del 7 por ciento anual durante la última década MGI (2017), lo que demuestra que está a la cabeza de la economía a nivel mundial.

**Figura 4-2:** Países con mayor número de autores en el campo de conocimiento



Fuente: Elaboración propia

### **4.3. Revisión Sistemática de la Literatura.**

Esta sección de la investigación presenta la categorización de los artículos de revistas revisados con base en el análisis de contenido. Luego del análisis de las palabras clave y los contenidos, los artículos se agruparon en dos grandes categorías.

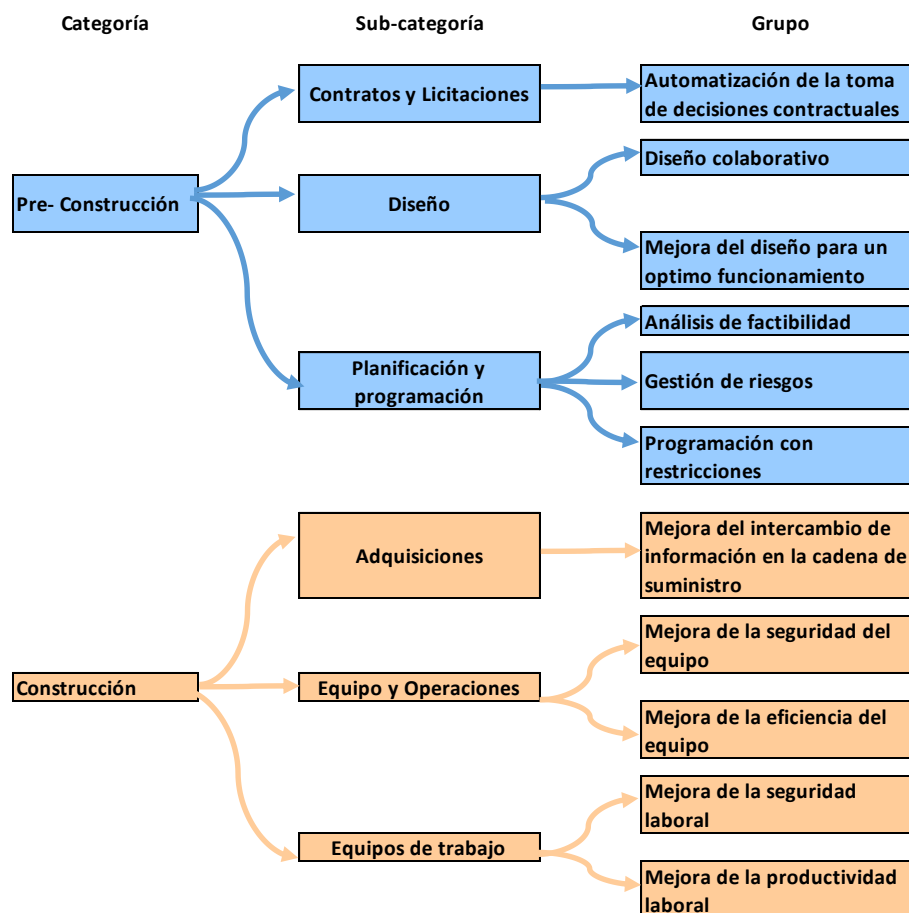
Un proyecto de construcción se divide en tres fases principales (1- pre-construcción, 2- construcción, 3- post-construcción), de las cuales se eligieron las dos fases iniciales para categorizar los documentos, pues en éstas es donde realmente tienen aplicación las herramientas iterativas para la simulación de la construcción o diseño de ejecución.

Durante la investigación se evidenciaron algunos estudios aplicados a la fase de Post-construcción, pero éstos no se tuvieron en cuenta dentro del análisis de categorización, puesto que las investigaciones realizadas en dicha fase, no tienen aplicabilidad directa para la optimización de herramientas que aporten a la mejora de la productividad en la construcción.

Una vez definida la categoría principal, cada categoría se clasificó en varias subcategorías con respecto a las similitudes de contenido después de análisis adicionales. Por último, cada subcategoría se clasificó en varios grupos, cada uno de los cuales representaba las tendencias existentes dentro de cada subcategoría. Tal clasificación de varios niveles ayuda a encontrar y estudiar cualquier área específica.

La figura 4-3 presenta una descripción general de las 2 categorías, 6 subcategorías y 11 grupos, en las que clasificaron los documentos analizados. Hubo algunos documentos de investigación que podrían haber pertenecido en múltiples subcategorías. En estos casos, se acomodó el artículo en la subcategoría más relevante.

**Figura 4-3:** Categorización de artículos de revistas en función del análisis de contenido



Fuente: Elaboración propia

### 4.3.1. Fase de pre-construcción

Esta categoría incluye herramientas para resolver problemas relevantes para la fase previa a la construcción. Los estudios de investigación en esta categoría se dividen en las siguientes tres subcategorías:

#### Contratos y licitaciones.

Las investigaciones sobre este tema se centraron en la *automatización de los procesos* de toma de decisiones en la evaluación y selección de un contratista, subcontratista, miembro del equipo, empresa o proyecto que tiene potencial para ser elegidos para su contratación,

colaboración o ejecución y posteriormente, la firma de un contrato. De este grupo se encontraron solo 3 documentos de 103, lo que corresponde a 2,9%.

## **Diseño.**

Los estudios relacionados a esta subcategoría se circunscriben dentro de una de los siguientes grupos:

- Estudios destinados a aumentar la *colaboración en el proceso de diseño del proyecto*, pues diseñar es un proceso multidisciplinario y multiobjetivo, que exige un alto nivel de colaboración entre los miembros involucrados. En este grupo se analizaron 16 de 103 documentos, lo que corresponde a 15,5%. Este grupo se ubica en tercer lugar de importancia dentro de los análisis bibliométricos al igual que el grupo: programación con restricciones
- Estudios destinados a *mejorar el diseño del proyecto*, no solo de la operación alineada con el uso previsto del edificio, sino la planificación eficiente de los procesos constructivos a llevar a cabo para materializarlo. En este grupo se analizaron 23 de 103 documentos, lo que corresponde a 22,3%. Siendo el grupo de mayor impacto dentro del estudio de simulación.

## **Planificación y programación**

Debido a su naturaleza dinámica, en los proyectos de construcción existen altos niveles de riesgo e incertidumbre, lo cual genera que las limitaciones de tiempo, presupuesto y recursos requieran de actividades de gestión, planificación y programación antes del inicio de la fase de construcción. Por tanto, los grupos pertenecientes a esta subcategoría son los siguientes:

- Estudios destinados a realizar *análisis de factibilidad*, que son necesarios previo a tomar cualquier decisión sobre la viabilidad de un proyecto de construcción. Es importante estudiar cuidadosamente los factores que afectan el éxito de la inversión



---

del proyecto, sus incertidumbres y las conexiones interrelacionadas. Además, la viabilidad de los enfoques de construcción y las estrategias de financiación deben tenerse en cuenta concienzudamente en la fase de planificación de un proyecto. En este grupo se analizaron 4 de 103 documentos, lo que corresponde a 3,9%.

- Estudios enfocados en la *gestión de riesgos*. Los riesgos son partes ineludibles de los proyectos de construcción, impuestos por cualquier factor impredecible, desconocido o incierto. Identificar los riesgos potenciales de un proyecto, así como sus interacciones y acomodarlos en un modelo de simulación puede ayudar a mitigar sus consecuencias en el logro de un proyecto. En este grupo se analizaron 7 de 103 documentos, lo que corresponde a 6,8%.
- Estudios destinados a la *programación de proyectos y actividades bajo restricciones* son de vital importancia, para lo cual es necesario desarrollar un cronograma efectivo que pueda satisfacer todas las restricciones e incertidumbres de un proyecto teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo, presupuesto y recursos. En este grupo se analizaron 16 de 103 documentos, lo que corresponde a 15,5%. Este grupo se ubica en tercer lugar de importancia dentro del análisis bibliométrico, al igual que el grupo *diseño colaborativo*.

### **4.3.2. Fase de construcción**

En esta categoría se clasificaron los estudios de investigación concernientes a la ejecución o materialización del proyecto y se dividió en las siguientes tres subcategorías:

#### **Adquisiciones.**

La entrega de bienes y materiales a los sitios de construcción en la cantidad correcta, la calidad deseada y el costo apropiado de manera oportuna es de vital importancia, ya que esto puede afectar considerablemente la productividad, la calidad, el costo y la duración de todo el proyecto. Los estudios se centran en el correcto intercambio de información. De esta subcategoría solo se definió un grupo para la *mejora del intercambio de información* en la cadena de suministro, y se recuperaron solo 2 documentos de 103, lo cual corresponde a 1,9%, siendo el grupo menos tratado de todos.

## Equipos y operaciones.

Esta subcategoría es importante para mejorar las operaciones de los equipos en la ejecución, pues éstos juegan un papel integral en la fase de construcción para optimizar el rendimiento y velocidad de construcción.

- Estudios relacionados con aspectos de *seguridad de las operaciones de equipos* de construcción, que en su gran mayoría están asociados con las grúas, debido a su importancia dentro de la ejecución y a la visión limitada de los operadores generados por obstáculos estáticos o dinámicos existentes. En este grupo se analizaron 9 documentos de 103, lo cual corresponde a 8,7%.
- Estudios relacionados con el aumento de la *eficiencia de las operaciones del equipo*, así como la seguridad en las operaciones de los mismos es de suma importancia, pues su labor ayuda con la mejora de los costos, disminución de tiempo en las operaciones y en general con la eficiencia de las tareas. En este grupo se analizaron 3 documentos de 103, lo cual corresponde a 2,9%

## Equipos de trabajo (Mano de obra y cuadrillas)

El papel de los trabajadores y las cuadrillas para lograr un entorno de construcción seguro y productivo es esencial. Los trabajadores tienen diferentes características, antecedentes, conocimientos, niveles de habilidad, y percepciones del entorno. También, interactúan con sus compañeros de trabajo, supervisores de obra y miembros del equipo de gestión. Estas interacciones sociales impactan sus actitudes hacia la seguridad y la productividad durante la ejecución, por lo que esta subcategoría se clasifica en grupos orientados a la seguridad y orientados a la productividad.

- Estudios enfocados a la *mejora de la seguridad en el trabajo*, que se centran en mejorar la seguridad de los trabajadores en la construcción y mejorar el desempeño general de la seguridad del proyecto. De este grupo se encontraron solo 2 documentos de 103, lo que corresponde a 1,9%.

- Estudios enfocados a la *mejora de la productividad en el trabajo*, exploran los efectos de los comportamientos y características de los trabajadores en el desempeño de la productividad y el impacto en los proyectos. En este grupo se encontraron 18 documentos de 103, obteniendo como resultado un 17,5% de incidencia ubicándose en el segundo lugar de importancia dentro del análisis.

#### **4.4. Discusión y hallazgos**

Los resultados de los análisis bibliométricos y el análisis de contenido se utilizaron en combinación para brindar mayor claridad en la información sobre las aplicaciones de las herramientas empleadas en la simulación de la construcción mediante la identificación de áreas de investigación populares y de tendencia. Además de los 103 artículos revisados, se utilizó información de otras fuentes, como libros, documentos de conferencias y sitios web de Internet, con fines de interpretación. En la tabla 4-2 se observa la distribución de las publicaciones en categorías, subcategorías y grupos, además, indica el número de documento que constituyen las 2 categorías y cada uno de los grupos de dichas categorías.

Si bien, el análisis del número de publicaciones separado por grupo puede ser informativo, se puede discernir más información al detallar el contenido de cada grupo. Es así que el grupo más influyente en la simulación de construcción corresponde a grupo Mejora del diseño para un mejor funcionamiento en el cual se encontraron 23 documentos (22,3% del total de publicaciones), seguidamente está el grupo de mejora de la productividad laboral con 18 documentos (17,5%) y en tercer lugar están dos grupos, diseño colaborativo y programación con restricciones, ambos grupos con 16 documentos cada uno (15,5% por grupo).

Al analizar las categorías correspondientes a las fases de pre-construcción y fase construcción, se evidencia que la primera registra un total de 69 documentos correspondiente al 67% del total, y la segunda con 34 documentos correspondiente a 33% del total. Lo cual demuestra la importancia de la simulación previo a la materialización de los proyectos. Cabe destacar, que en la fase de construcción el grupo con mayor cantidad

de documentos fue el de mejora de la productividad laboral, quedando en evidencia que este grupo tiene una injerencia importante en el desarrollo de procesos iterativos, con el propósito de mejorar la optimización de la productividad durante la ejecución.

**Tabla 4-2:** Dispersión de publicaciones en simulación de la construcción

Categoría		Cant. Documentos	Incidencia
<b>Pre- Construcción</b>		<b>69</b>	<b>67%</b>
Subcategoría	Grupo		
<b>Contratos y Licitaciones</b>	<b>Automatización de la toma de decisiones contractuales</b>	3	2,9%
	<b>Diseño</b>	16	15,5%
<b>Planificación y programación</b>	<b>Mejora del diseño para un mejor funcionamiento</b>	<b>23</b>	<b>22,3%</b>
	<b>Análisis de factibilidad</b>	4	3,9%
	<b>Gestión de riesgos</b>	7	6,8%
	<b>Programación con restricciones</b>	<b>16</b>	<b>15,5%</b>

Categoría		Cant. Documentos	Incidencia
<b>Construcción</b>		<b>34</b>	<b>33%</b>
Subcategoría	Grupo		
<b>Adquisiciones</b>	<b>Mejora del intercambio de información en la cadena de suministro</b>	2	1,9%
	<b>Equipo y Operaciones</b>	3	2,9%
<b>Equipos de trabajo</b>	<b>Mejora de la eficiencia del equipo</b>	9	8,7%
	<b>Mejora de la seguridad en laboral</b>	2	1,9%
	<b>Mejora de la productividad laboral</b>	<b>18</b>	<b>17,5%</b>

Fuente: Elaboración propia

## **5. Variables para el desarrollo de herramientas iterativas de gestión y planificación del diseño de ejecución.**

En el capítulo 3 se identificaron las metodologías y herramientas de gestión de proyectos, en el capítulo 4 se categorizaron esas metodologías de acuerdo con su aplicación en la industria de la construcción, mediante los análisis bibliométricos y de contenido, teniendo en cuenta 103 documentos que fueron revisados. En este capítulo, se definieron las principales variables que se deben tener en cuenta en el desarrollo de herramientas informáticas que permitan establecer procesos de diseño y diseño de ejecución de manera iterativa y logren optimizar la calidad, los tiempos y costos en la realización del proyecto.

Ya se ha mencionado anteriormente que los proyectos de construcción son complejos, dinámicos y presentan cambios que se deben atender para ajustar el diseño o ejecución a las nuevas condiciones de trabajo con el fin de minimizar retrasos y sobrecostos. El efecto de cambios simultáneos se puede acumular en serie o en paralelo, por lo que resulta importante para la dirección de proyecto, estar al tanto de los flujos de procesos y así poder tomar medidas de previsión para controlar las desviaciones asociadas a la calidad y alineamiento de la información. Se supone beneficioso para el proyecto tener la capacidad de evaluar previamente los posibles retrasos durante la fase de construcción, para lo cual se debe definir un diseño de ejecución que permita la elaboración de diferentes alternativas que estén acorde con el alcance y las necesidades, y permita a su vez sortear los imprevistos que generan los cambios no planificados.

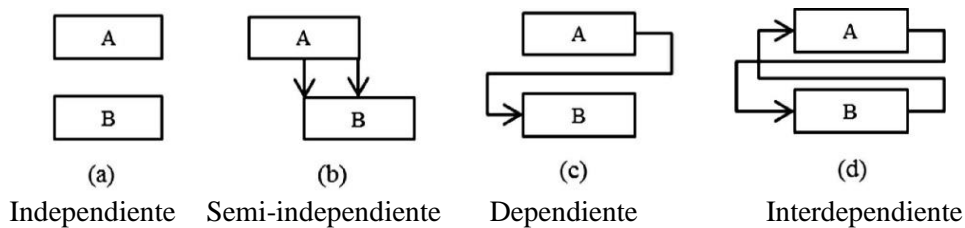
Con el ánimo de comprender la importancia de la planificación y sus implicaciones, se plantea un escenario simulado en el que se ha propuesto un cambio a una actividad durante la fase de ejecución, que ya se ha iniciado, el trabajo tiene que ser detenido inmediatamente para incorporar un cambio requerido, lo cual da lugar a suspensión y luego a la reanudación de los trabajos. La actividad en particular se retrasa, así como también, se retrasarán las actividades dependientes. Además, el proceso de toma de decisiones que incluye el poner de acuerdo a los diferentes involucrados, dará lugar en la mayoría de

los casos, a la detención de las actividades de construcción (Charlesraj & Pal, 2018). Según lo mencionan en su investigación Singhal et al. (2018), cuando los cambios son derivados del proceso de diseño, el impacto del cambio es costoso durante la fase de ejecución, ya que pueden estar en la forma de adición, eliminación o modificación en el alcance del proyecto.

## 5.1. Secuencia de actividades y dependencia entre actividades.

Las entradas básicas para planificar una fase de diseño incluyen actividades y las relaciones de información entre ellas. Por lo general, existen cuatro tipos de dependencias de información en cualquier fase de diseño, como son: independientes, semiindependientes, dependientes e interdependientes (Mujumdar & Maheswari, 2018) según se muestra en la figura 5-1.

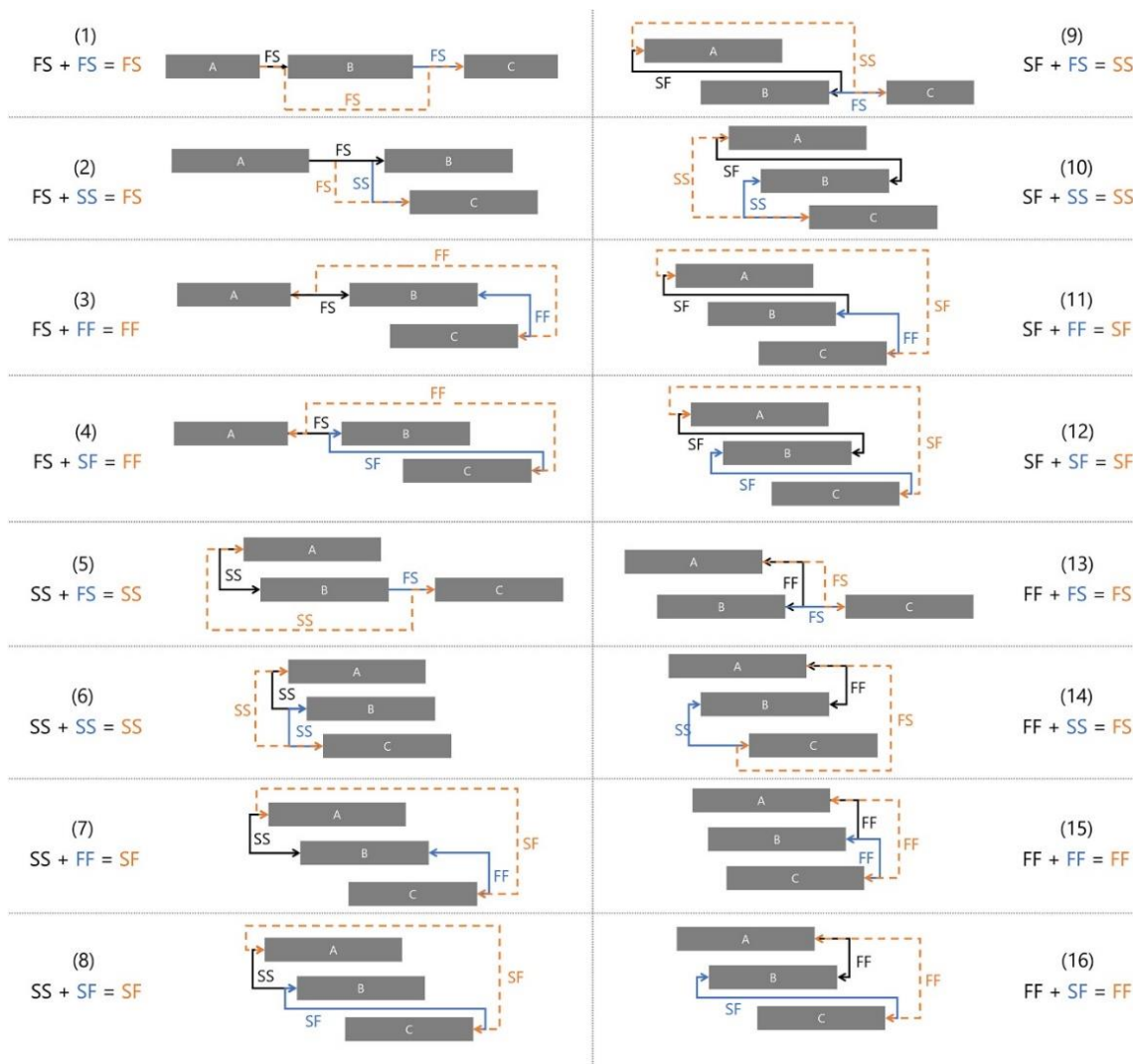
**Figura 5-1:** Relación entre actividades de diseño.



Fuente: Adaptado de (Mujumdar & Maheswari, 2018)

La figura 5-2 muestra relaciones indirectas de segundo grado que se formalizan para todas las combinaciones posibles de dependencias lógicas directas entre actividades. La Actividad A es una predecesora de la Actividad B y la Actividad B es una predecesora de la Actividad C. Las flechas en negro representan dependencias directas entre la Actividad A y la Actividad B. Las flechas que se muestran en azul son las dependencias directas entre la Actividad B y la Actividad C. Las flechas en naranja muestran las dependencias indirectas entre A y C. La convención de las relaciones entre actividades se identifica de la siguiente forma: fin -comienzo (Finish-Start **FS**), comienzo-comienzo (Start-Start **SS**) comienzo a fin (**SF**) y de fin a fin (**FF**).

**Figura 5-2:** Formalización de 16 maneras de relaciones indirectas de actividades (F: Fin ; S: Comienzo).



Tomada de: (Amer et al., 2022).

Las relaciones entre actividades nos permiten evidenciar el proceso que se debe llevar a cabo para definir la secuencia lógica del desarrollo del proyecto. Para poder establecer este proceso se debe acudir al enfoque tradicional donde a partir de la definición de las actividades o tareas que se realiza con la estructura de descomposición del trabajo (EDT) y/o paquetes de trabajo se van enlazando éstas por medio de metodología de cascada con la relación más indicada de acuerdo con las figuras 5-1 y 5-2.

## 5.2. Evaluación de los cronogramas.

La Agencia de Administración de Contratos de Defensa de EE. UU. (DCMA, por sus siglas en inglés) es responsable de supervisar los programas de adquisiciones federales. En un esfuerzo por mejorar las prácticas de programación utilizadas, la DCMA ha desarrollado y publicado un protocolo de verificación de evaluación de 14 puntos que definen la calidad del cronograma y ofrecen métodos sistemáticos para garantizarla (Winter, 2011).

Aunque no se considera un estándar de la industria, DCMA 14 es un conjunto integral de pautas para planificar, administrar y controlar planes de proyectos. Los 14 puntos de control de DCMA garantizan muchos beneficios para el cronograma del proyecto (*Evaluación de 14 Puntos DCMA, Análisis de Calidad Del Cronograma Del Proyecto*, n.d.). Algunos de ellos son los siguientes:

- Proporcionar la posibilidad de un análisis en profundidad constante del cronograma.
- Ayudar a identificar puntos débiles en el cronograma.
- Asistir en la designación de problemas potenciales en torno a las actividades del proyecto y en la creación de planes correctivos apropiados.
- Asegurar que el proyecto sea gestionado y ejecutado con éxito y a tiempo.

Estas pautas enumeran la "lógica" como una métrica de control esencial y requieren que los planificadores se aseguren de que sus cronogramas no tengan dependencias lógicas faltantes o incorrectas. Verificar la lógica requiere un amplio conocimiento del dominio de la construcción, y los planificadores lo realizan de forma totalmente manual, ya que no hay soluciones de software disponibles que lo admitan (Amer et al., 2022).

De acuerdo con los 14 puntos de control establecidos por DCMA, se debe tener en cuenta las siguientes variables para desarrollar un cronograma adecuado que permita establecer el proceso de diseño de ejecución más eficiente y realizar los ajustes necesarios cada vez que se requiera hacer una iteración para optimizar el proceso de planeación de los proyectos de construcción. A continuación, se describen 7 de los 14 puntos de control que



se consideraron en esta investigación como elementos fundamentales para la evaluación de los cronogramas.

### **5.2.1. Lógica de programación**

Estando identificada la secuencia y relación de las actividades, es necesario realizar la verificación lógica que busca garantizar que todas las actividades no completadas hayan definido predecesores y sucesores. Solo un enlace faltante puede tener un impacto significativo en la fecha de finalización del proyecto, por lo que es imprescindible analizar la lógica de la red para asegurarse de que estén presentes todas las dependencias. El umbral de DCMA para esta métrica, es que no más del 5% de las actividades no completadas deben perder un predecesor y / o sucesor.

### **5.2.2. Tipos de relaciones**

La evaluación de DCMA establece que el 90% (o más) de las dependencias de programación deben ser fin - comienzo (Finish-Start FS), pues este tipo de relación proporciona una ruta lógica del proyecto. Si se tienen dependencias comienzo-comienzo (Start-Start SS) son aceptables, pero construir un cronograma completo usando SS es obviamente inaceptable. Los otros tipos de relaciones, que pueden identificarse en un programa, son de comienzo a fin (SF) y de fin a fin (FF), que rara vez se utilizan. Sin embargo, no es recomendable usarlos, ya que son más difíciles de monitorear y controlar.

### **5.2.3. Holguras largas**

Esta métrica representa el tiempo (horas / días) que una actividad puede retrasarse sin afectar negativamente los hitos del proyecto y / o el tiempo estimado para la finalización del proyecto.

Es posible que las actividades no se vinculen correctamente y puedan causar estrés en la ruta crítica. Según la DCMA, los valores de holguras total están limitados a 44 días hábiles,

por lo tanto, es necesario revisar que las tareas que tengan una holgura total de más de 2 meses se debe limitar su uso al 5% de las tareas no completadas.

#### **5.2.4. Duraciones muy largas**

Se debe limitar las tareas de larga duración al 5% de las tareas no completadas. La duración de las tareas no debe ser superior a dos meses para respaldar los esfuerzos de actualización e informes del cronograma. Es necesario desglosar las actividades largas en una serie de actividades más cortas para obtener más detalles, lo cual se puede lograr con un adecuado diseño de la EDT del proyecto.

#### **5.2.5. Actividades demoradas**

Esta es una verificación que permite analizar cuántas actividades han finalizado tarde en comparación con la fecha de referencia, monitoreando el desplazamiento excesivo. Solo el 5% de las actividades pueden pasar de sus fechas de referencia de finalización. Esta métrica es una medida conservadora y retrospectiva del progreso del cronograma que ayuda a definir las iteraciones necesarias para recomponer el cronograma de un proyecto en ejecución.

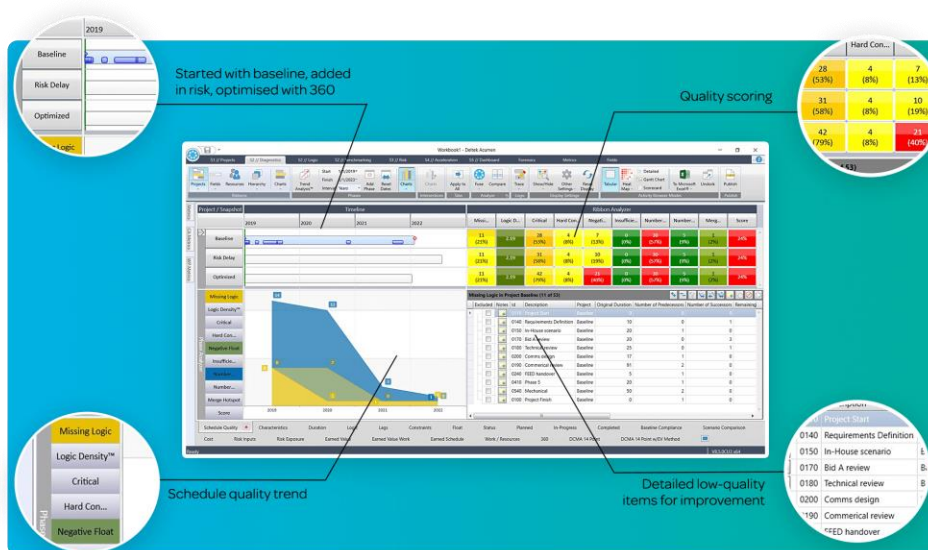
#### **5.2.6. Índice de rendimiento de la línea base**

El índice de ejecución de línea de base es un indicador de alerta temprana de que un cronograma tiene problemas para no cumplir con la fecha límite. Esta prueba calcula la proporción de todas las tareas que se han completado frente a las tareas que deberían haberse completado en el período entre el cronograma de referencia y el cronograma actual. La relación objetivo es 1,0 con una relación por debajo del 95% es considerada como una falla.

Existen algunas herramientas informáticas que establecen este control de lógicas como Deltek-Acumen, cuyos parámetros de auditoría están preconfigurados para brindar una visión global y precisa de los cronogramas que se gestionan, además muchos

profesionales establecen bajo el concepto de DCMA, esquemas configurados a través de Power-BI. La figura 5-3, muestra una visión general de la interfaz de usuario, donde se pueden visualizar los reportes de auditoría de las métricas que generan una mala calidad del cronograma.

**Figura 5-3:** Reportes de auditoría de las métricas que generan esquemas configurados a través de Power-BI



Tomado de <https://www.deltek.com/en-gb/products/project-and-portfolio-management/acumen>

### 5.2.7. Evaluación de la ruta crítica

Esta es una prueba hipotética realizada directamente en el cronograma. Su intención es identificar una actividad de ruta crítica actual, para extender en gran medida su duración restante y observar si se produce una extensión correspondiente a la fecha de finalización del proyecto. En otras palabras, si la fecha de finalización del proyecto no se retrasa por la misma cantidad de días (600 días es el periodo que recomienda DCMA para realizar la prueba), significa que en algún lugar del cronograma existe una lógica interrumpida que puede ser el resultado de la falta de actividades predecesoras y / o sucesoras. Si esto sucede, es imperativo ejecutar un análisis en profundidad del cronograma del proyecto.

### **5.3. Revisión de avance y rendimiento.**

El éxito de la ejecución de un proyecto depende, en parte, de la existencia de un cronograma maestro integrado y fiable, que defina cuándo y cuánto tiempo se va a trabajar y cómo se relaciona cada actividad con las demás. Es necesario para los programas de adquisición y no sólo proporciona una hoja de ruta para la ejecución sistemática del proyecto, sino que también es el medio para medir el progreso, identificar y resolver posibles problemas y promover la responsabilidad de todos los participantes.

Una comparación objetivo-real se debe realizar para identificar las desviaciones entre el programa objetivo planificado y el programa real. Con base en los resultados de la comparación, se realiza una optimización basada en simulación con el objetivo de minimizar las desviaciones entre el cronograma planificado y el real (Szczesny & König, 2015). Esta es una manera de determinar si las causas de los retrasos son debidas a deficiencias en el rendimiento, lo cual permite definir el incremento de personal o equipo para mejorar el rendimiento de ejecución del proyecto. En su investigación Rudeli (2019), plantea que conocer el pronóstico de avance en función de los avances pasados, permite al gestor, que ya tiene una idea global del desarrollo futuro de su proyecto, poder predecir el avance físico del décimo siguiente.

Conociendo el avance físico de los decimos siguientes el gestor de proyecto será además capaz de tener una noción del ingreso monetario que este avance de obra implicará, dado que en los proyectos de construcción los pagos se realizan en función de los avances físicos del cronograma. De este modo, podrá estimar no solo cuánto es el avance físico sino cuánto deberán ser los ingresos en los próximos meses con una precisión mayor (Rudeli, 2019) pudiendo definir con claridad el flujo de caja requerido para un óptimo desempeño del proyecto.

La adaptación de los cronogramas de construcción con base a los datos logísticos actuales es un aspecto importante en el contexto de una ejecución eficiente del proyecto. Estos datos actuales pueden revelar interrupciones en los procesos logísticos de construcción,

por ejemplo, retrasos en la entrega de materiales o averías en las máquinas, entre otros, lo que implica que se debe hacer iteraciones de ajuste en dichos cronogramas para poder enrutar el proyecto por el camino más propicio para cumplir con los objetivos de costo, tiempo y alcance.

## **5.4. Planteamiento de desarrollo de herramientas iterativas para el diseño de ejecución**

Teniendo ya conocidos los diferentes enfoques y metodologías de gestión para el diseño de proyectos y diseño de ejecución, se evidencia que tanto, los enfoques tradicionales como los ágiles tienen sus ventajas y desventajas, siendo necesario acudir a la implementación de ambos enfoques a través del enfoque híbrido para el desarrollo de nuevas herramientas que permitan optimizar el planeamiento de la construcción en cualquiera de sus fases.

El enfoque tradicional es más apropiado para proyectos con requisitos iniciales claros del usuario y objetivos claros del proyecto, por lo tanto, con un nivel de incertidumbre muy bajo. Se espera que dichos proyectos tengan una tasa de cambio de requisitos muy baja, y no es necesario involucrar mucho a los usuarios finales en el proyecto (Špundak, 2014).

Por otro lado, el enfoque ágil de gestión de proyectos está destinado a proyectos que se caracterizan por un alto nivel de incertidumbre, objetivos del proyecto poco claros o solicitudes incompletas e impredecibles, por lo que se podría suponer que cambiarán significativamente durante el curso del proyecto.

Seguir los pasos típicos para construir un modelo de simulación en construcción variará según el tipo y la complejidad del proyecto a desarrollar. Posiblemente la metodología de gestión de proyectos más adecuada podría ser una combinación de elementos basados en un enfoque ágil y elementos basados en un enfoque tradicional, ya que ni la metodología de gestión de proyectos totalmente ágil ni la totalmente tradicional serían el

mejor ajuste, por lo que se debe apelar a una combinación de éstas y definir una metodología híbrida.

El objetivo de la metodología seleccionada de gestión de proyectos para desarrollar el diseño de ejecución en la construcción, es aumentar la probabilidad de una entrega exitosa del proyecto y brindar consistencia y flexibilidad que conducirán a la eficiencia del equipo del proyecto. Además, otros beneficios incluyen un mejor control de los objetivos y el alcance del proyecto, un tiempo de comercialización más rápido, menos riesgos, procesos más eficientes, incluido el proceso de toma de decisiones y el proceso de gestión de la calidad. Asimismo, una mejor satisfacción del cliente, una mejor gestión del conocimiento al permitir el intercambio de información entre proyectos y permitiendo más tiempo para actividades de valor agregado. Pero, la metodología por sí misma no es condición previa suficiente o incluso necesaria para el éxito del proyecto (Špundak, 2014)

El cronograma es una base esencial para gestionar las compensaciones entre el costo, el tiempo y el alcance. Entre otras cosas, permite a la dirección del proyecto decidir entre posibles secuencias de actividades, determinar la flexibilidad del calendario en función de los recursos disponibles, predecir las consecuencias de la acción o inacción de los responsables de las actividades y asignar planes de contingencia para mitigar el riesgo. Tras los cambios en un programa el calendario se utiliza para prever los efectos de los retrasos, las supresiones y los esfuerzos añadidos, así como las posibles rutas de recuperación de tiempo y costos.

Una vez conocidas las diferentes metodologías para la planeación de proyectos de construcción se plantea en esta investigación los pasos requeridos como guía procedimental para el desarrollo de una herramienta que permita realizar diseño de ejecución en proyectos de construcción y optimizarlo en las diferentes fases a partir de iteraciones.

1. Constituir el listado de actividades que conforman el proyecto o elemento constructivo a diseñar a partir de la EDT asociada a la metodología cascada del enfoque tradicional.

2. Definir la duración de las actividades en función al rendimiento de ejecución a partir de registros históricos-estadísticos que posea el programador.
3. Establecer la relación entre actividades (enlaces) empleando los métodos PERT o CPM asociados a una gráfica de diagrama de Gantt.
4. Detallar la duración de paquetes de trabajo (sistemas constructivos) a partir de diferentes alternativas (rendimiento / equipos de trabajo-cuadrillas).
5. Realizar un diagrama –DSM- para poder evidenciar con mayor facilidad los ajustes realizados al proceso a partir de la iteración o iteraciones hasta definir la de mejor comportamiento respecto a la velocidad de ejecución / iteración (tiempo). En el caso que se quiera hacer partícipes a los actores y / o responsables de cada una de las actividades se puede implementar la herramienta MDM que es la evolución del DSM, la cual permite evidenciar las relaciones entre actores, y actores con las actividades. Esta herramienta ayuda a visualizar un rápido ajuste de las variables y a volver a reacomodar nuevamente las actividades, para tomar una decisión con prontitud considerable.
6. Al desarrollar las diferentes actividades, se debe hacer control y seguimiento de los avances mediante la herramienta LPS con el fin de determinar las fallas o deficiencias del cronograma en periodos de tiempo cortos (quincenal o semanal son fracciones de tiempo frecuentes para proyectos de construcción) y a partir de la evaluación del cumplimiento o no de las actividades con el PAC que se determine para realizar el control (para el cumplimiento es común establecer un PAC de 80%), este se califica con un código binario de 0 o 1, siendo cero la calificación para la actividad no completada y 1 la completada. Al obtener un cero, se debe activar una alerta para incluir dicha actividad en el proceso de iteración con el fin de optimizar el diseño de ejecución a través de iteraciones necesarias que permitan tomar decisiones como incrementar recursos para mejorar los rendimientos. Además, el control de avance del proyecto con LPS y reestructurar la secuencia de ejecución con las tareas que no hayan cumplido con el logro definido en la ventana de análisis, se recomienda hacerlo a través de una simulación de dinámica de sistemas o alguna de las otras herramientas de TI mencionadas anteriormente, que mejor se acople a las necesidades particulares del proyecto.

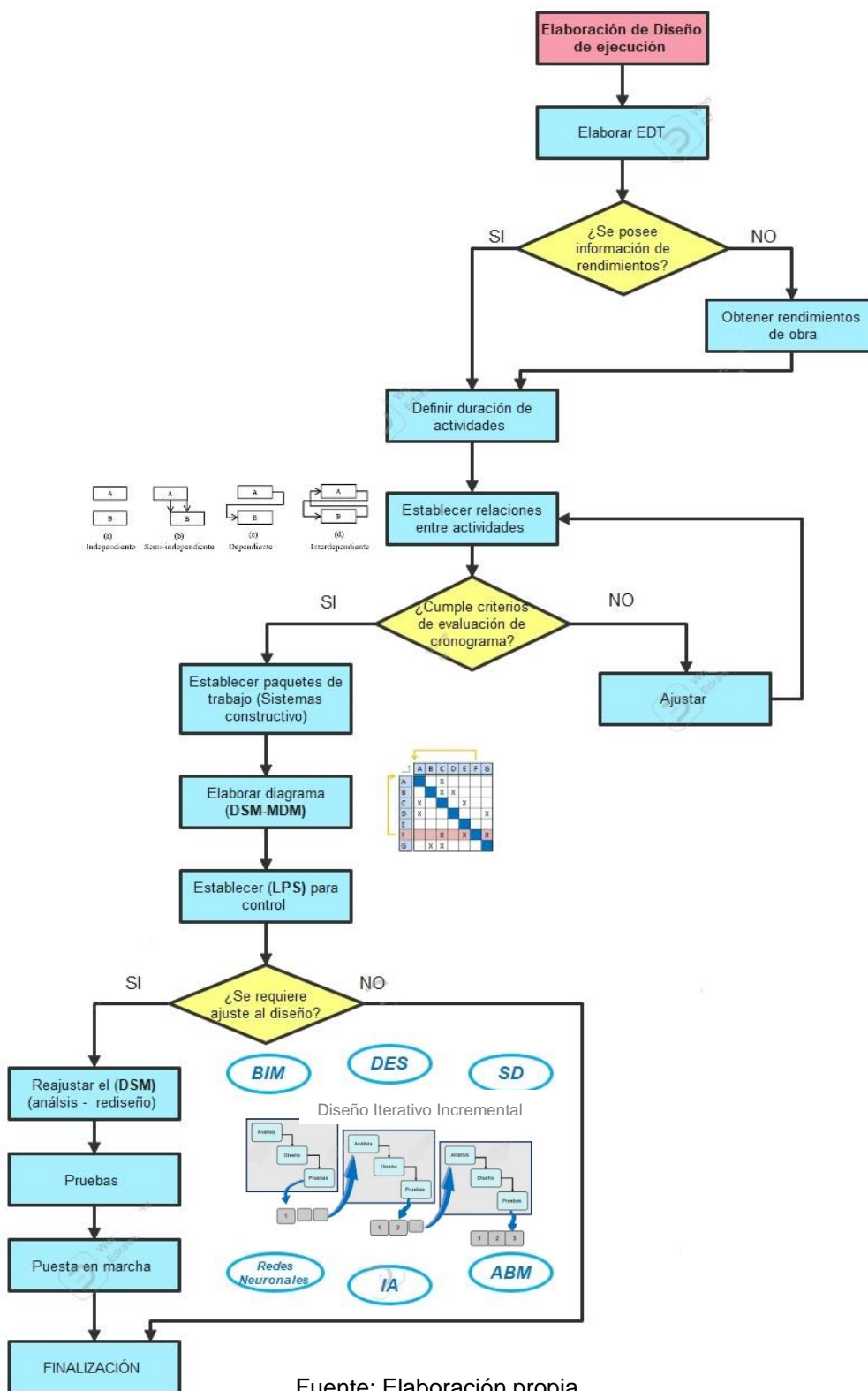
Esta herramienta debe tener un vínculo directo con el modelo digital 3D desarrollado mediante la metodología BIM, con el propósito de poder evidenciar en el modelo los cambios o ajustes requeridos en el diseño de ejecución por cada iteración que se haga tanto en la fase de diseño, como en la fase de construcción. O que los cambios sean de manera contraria, que éstos se presenten en el modelo 3D y se deban incluir en el diseño de ejecución.

Se pueden desarrollar muchas otras plataformas similares en el futuro, que abarquen otros aspectos de comportamiento e interacción del personal de construcción en varias fases y etapas del proyecto. El desarrollo de dichas plataformas no solo ahorra tiempo a los investigadores al evitar que realicen trabajos repetitivos, sino que también eleva la calidad de la investigación futura al permitir que los investigadores inicien su trabajo desde un punto actualizado.

La figura 5-4 presenta diagrama de flujo con una propuesta de desarrollo, donde se establecen los pasos a seguir para la elaboración del diseño de ejecución implementando e integrando diferentes metodologías y herramientas de gestión de proyectos.

**Figura 5-4:** Diagrama de flujo estructura de diseño de ejecución





Fuente: Elaboración propia



## 6. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los objetivos planteados en esta investigación, los cuales fueron: 1) *Identificar* las metodologías y herramientas que se emplean en la gestión de proyectos de la industria de la construcción, 2) *Categorizar* los estudios de aplicaciones de diseño de ejecución a partir de análisis bibliométricos y de contenido en cuanto a la variable velocidad de ejecución/iteración y 3) *Determinar* las variables de trabajo para optimizar las prácticas de planificación que permitan establecer parámetros de desarrollo de una herramienta de gestión de proyectos y de ejecución, se hizo necesario dar respuesta a la problemática de optimizar la manera común en que se realiza la gestión de proyectos de construcción, la cual se hace a través de metodologías tradicionales por procesos lineales de progresión unidireccional, que no admiten iteraciones que permitan explorar y evaluar diferentes alternativas de diseño, para mejorar la calidad, el tiempo y los costos.

### 6.1. Conclusiones

En la literatura estudiada está reportado con recurrencia el problema de baja productividad de la industria de la construcción, debido en gran medida a la falta o deficiente planeación de los proyectos en la fase de diseños, lo cual genera demoras y sobrecostos principalmente en la fase de construcción o materialización.

Esta tesis arrojó como resultado que los retrasos y problemas de sobrecostos de los proyectos, pueden minimizarse al desarrollar métodos iterativos predictivos, que integren diversas metodologías y herramientas empleadas en la gestión de proyectos. Las metodologías que mejor se adaptan para desarrollo de herramientas que permitan optimizar la productividad en la industria de la construcción, son las híbridas, las cuales integran enfoques tradicionales y ágiles, además, métodos de desarrollo de las tecnologías de información TI, que pueden determinar posibles tendencias de comportamiento de los proyectos y proporcionar información valiosa para modelar las operaciones de construcción y utilizarse para elaborar cronogramas y calcular costos más realistas.

Se *identificaron* las metodologías de gestión de proyectos que se emplean en la construcción, y se clasificaron en enfoques tradicionales, ágiles e híbridos; destacándose las metodologías del enfoque híbrido para el propósito de esta investigación. Es importante

recalcar que el enfoque tradicional es más usado para proyectos con requisitos iniciales definidos por el cliente y objetivos claros del proyecto, por lo tanto, con un nivel de incertidumbre más bajo y empleado en la fase de definición y planificación, a su vez, el enfoque ágil permite cambios (iteraciones) durante la fase de ejecución del proyecto.

Las metodologías o herramientas empleadas para el diseño de ejecución en la industria de la construcción, se enmarcan dentro de los enfoques de gestión de proyectos tradicional o ágil, los cuales tienen sus ventajas y desventajas, en función de las diferentes particularidades de cada proyecto. En la selección del enfoque se deben considerar las características del proyecto y el entorno organizacional. Normalmente una metodología suele no ser suficiente, por lo anterior es importante analizar varias metodologías de gestión, para cada contexto organizacional y las particularidades del proyecto, con la finalidad de elegir la metodología que mejor se adapte a cada uno en específico. Es importante tener en cuenta que la metodología de gestión debe adaptarse al proyecto y no al contrario.

Se *categorizaron* los estudios de aplicaciones de diseño de ejecución a partir de análisis bibliométricos y de contenido, lo cual permitió definir las necesidades y tendencias de la industria para satisfacer los nuevos requerimientos, que exige la economía mundial como lo son: el incremento de la productividad, eficiencia energética, repensar los procesos de diseño e ingeniería, mejorar la ejecución en el sitio, la gestión de las compras y cadena de suministro, así como, la cualificación de la mano de obra, la implementación de tecnología digital, el uso de nuevos materiales y automatización avanzada.

Al comparar los resultados de los análisis bibliométricos y el análisis de contenido en las categorías correspondientes a las fases de pre-construcción y fase de construcción, se evidencia que la primera registra un total de 69 documentos correspondiente al 67% del total, y la segunda con 34 documentos correspondiente a 33% del total. Lo cual demuestra la importancia de la simulación previo a la materialización de los proyectos.

Cabe destacar, que al realizar la clasificación detallada de los documentos analizados, el grupo más influyente en la simulación de construcción corresponde al de mejora del diseño para un mejor funcionamiento, en el cual se encontraron 23 documentos (22,3% del total

de publicaciones), seguidamente está el grupo de mejora de la productividad laboral con 18 documentos (17,5%) y en tercer lugar están dos grupos, diseño colaborativo y programación con restricciones, ambos grupos con 16 documentos cada uno (15,5% por grupo).

En la fase de construcción el grupo con mayor cantidad de documentos fue el de mejora de la productividad laboral, quedando en evidencia que este grupo tiene una injerencia importante en el desarrollo de procesos iterativos, con el propósito de mejorar la optimización de la productividad durante la ejecución.

Se *determinaron* la secuencia de actividades y dependencia entre éstas, criterios de evaluación de los cronogramas, revisión de avances y rendimientos, como las variables necesarias para establecer los parámetros de desarrollo de herramientas informáticas, que permitan integrar de manera adecuada los diferentes enfoques, metodologías y métodos existentes para la gestión de proyectos, lo que puede llevar a diseñar la ejecución de manera iterativa predictiva y definir desde la fase de diseños, cuál es la mejor alternativa entre diversas propuestas evaluadas en función al rendimiento y optimización de la productividad, lo cual es un aporte importante a una problemática que posee la industria de la construcción a nivel global.

La optimización de los procesos constructivos con fines de mejoramiento en la productividad, genera valor agregado no solo a los dueños de proyectos, sino a los usuarios finales, pues una edificación más eficiente en las variables de tiempo y costo, redundará en el valor final del producto, impactando positivamente mercados como el inmobiliario, infraestructura, entre otros.

El camino emprendido para aumentar la productividad en el sector de la construcción es la digitalización de los procesos. Avanzamos hacia la implementación de las herramientas utilizadas en los procesos, mediante la aplicación sistemática de técnicas de IA, para

automatizar los mecanismos de simulación, modelización y solución de problemas de diseño.

## **6.2. Recomendaciones**

Los futuros esfuerzos de investigación deben desarrollar herramientas, marcos y modelos de apoyo a la toma de decisiones, pues la iteración se debe planificar cuidadosamente durante la fase de diseño para mejorar la productividad en la fase de construcción.

En consecuencia, las empresas constructoras pueden dar un paso adelante en la previsibilidad, la productividad y el rendimiento, introduciendo nuevos sistemas de gestión, sistemas técnicos e influyendo en el cambio de mentalidad y los comportamientos de todos los actores.

Como ejemplo, las aplicaciones de metodologías ágiles de manera conjunta con tecnologías de información como ABM, DES y SD podrían utilizarse para obtener índices de productividad realistas aplicables en la fase de pre-construcción con énfasis en el diseño de ejecución, ya que pueden ser un tema potencial para un estudio de revisión futuro.

A nivel académico se dejan las bases para el desarrollo de nuevas herramientas que se pueden implementar en la enseñanza del diseño de ejecución, teniendo como punto de partida las iteraciones que son necesarias en los proyectos de construcción en la actualidad, donde cada vez más, se requiere integrar metodologías de gestión y herramientas de las tecnologías de la información, lo cual permite la condensación teórica y práctica en la industria de la construcción para la mejora continua de los procesos, aumento de la rentabilidad y sustentabilidad de los proyectos.

El desarrollo de nuevas herramientas sería muy útil para los estudiantes de programas afines a la industria de la construcción, ya que éstos podrían contar con instrumentos, que les permitan abordar de manera más eficiente la interacción con el sector productivo y afianzar el conocimiento, generando una estructura mental que los lleve a desarrollar habilidades como la capacidad de síntesis, análisis, evaluación y ejecución de proyectos.

## 7. Bibliografía

- Abdelmegid, M. A., González, V. A., Poshdar, M., Sullivan, M. O., Walker, C. G., & Ying, F. (2020). Barriers to adopting simulation modelling in construction industry. *Automation in Construction*, 111(June 2019), 103046. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103046>
- Abourizk, S. (2010). Role of simulation in construction management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1140–1153. <https://doi.org/10.1080/09613219208727186>
- Agrama, F. A. (2012). Multi-objective genetic optimization of linear construction projects. *HBRC Journal*, 8(2), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2012.09.010>
- Aguanno, K. (2004). *Managing Agile Projects Augustine.pdf*. Multi-Media Publications Inc.
- Aguirre Barrera, J., & Aguirre Barrera, S. (2020). *Metodologías para el desarrollo de Proyectos*. 1–15.
- Amer, F., Hockenmaier, J., & Golparvar-Fard, M. (2022). Learning and critiquing pairwise activity relationships for schedule quality control via deep learning-based natural language processing. *Automation in Construction*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104036>
- Aravindhnan, K., Bandyopadhyay, T., Mehendale, M., & De, S. K. (2012). *Managing iterations in product development*. 7(1), 153–162.
- Asana. (2021a). *Cómo utilizar el método de la ruta crítica en la gestión de proyectos*. <https://asana.com/es/resources/critical-path-method>
- Asana. (2021b). *Las 12 metodologías más populares para la gestión de proyectos*. Asana. <https://asana.com/es/resources/project-management-methodologies>
- Aziz, R.F. (2013). Optimizing strategy software for repetitive construction projects within multi-mode resources. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3), 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.002>
- Aziz, Remon Fayek, & Hafez, S. M. (2013). Applying lean thinking in construction and

- performance improvement. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 679–695.  
<https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2013.04.008>
- Aziz, Remon Fayek, Hafez, S. M., & Abuel-Magd, Y. R. (2014). Smart optimization for mega construction projects using artificial intelligence. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 591–606. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.05.003>
- Bakry, I., Moselhi, O., & Zayed, T. (2014). Optimized acceleration of repetitive construction projects. *Automation in Construction*, 39, 145–151.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.07.003>
- Behzadan, A. H., Menassa, C. C., Tishman, J. L., & Pradhan, A. R. (2015). Enabling real time simulation of architecture, engineering, construction, and facility management (AEC/FM) systems: A review of formalism, model architecture, and data representation. *Journal of Information Technology in Construction*, 20, 1–23.
- Berrio, P. del C. (2015). Método para la organización control y optimización de costos en proyectos de construcción. *Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, 163.
- Boehm, B. (2002). Get ready for agile methods, with care. *Computer*, 35(1), 64–69.  
<https://doi.org/10.1109/2.976920>
- Bokor, O., Florez, L., Osborne, A., & Gledson, B. J. (2019). Overview of construction simulation approaches to model construction processes. *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, 11(1), 1853–1861.  
<https://doi.org/10.2478/otmcj-2018-0018>
- Borrego, M., Foster, M. J., & Froyd, J. E. (2014). Systematic literature reviews in engineering education and other developing interdisciplinary fields. *Journal of Engineering Education*, 103(1), 45–76. <https://doi.org/10.1002/jee.20038>
- Carvajal Jaramillo, H. H. (2013). *El Diseño de Ejecución. Un planteamiento metodológico para la enseñanza de la planeación de obras a constructores, arquitectos e ingenieros civiles.*
- Charlesraj, V. P. C., & Pal, A. (2018). *MDM-Based Buffer Estimación en Proyecto de Construcción.*
- Coram, M., & Bohner, S. (2005). *The Impact of Agile Methods on Software Project*



- Management A Brief Look at Agile Methods.*
- Cristaldo, P., Richard, C., Rivera, R., Schab, E., & Battista, A. De. (2018). *Propuesta Metodológica de Enfoque “ Híbrido ” para la Gestión de Proyectos de Minería de Datos.* 127–140.
- De Leo, E., Aranda, D., & Addati, G. A. (2020). Introducción a la teoría de sistemas. *Reis*, 25. <https://doi.org/10.2307/40184109>
- Del Savio, A. (2022). *Productividad en la Industria de la Construcción - CONEXIG.* [https://www.conexig.com/es/productividad\\_industria\\_construccion/](https://www.conexig.com/es/productividad_industria_construccion/)
- Ding, Z., Gong, W., Li, S., & Wu, Z. (2018). System Dynamics versus Agent-Based Modeling: A Review of Complexity Simulation in Construction Waste Management. *Sustainability 2018, Vol. 10, Page 2484, 10(7), 2484.* <https://doi.org/10.3390/SU10072484>
- Du, J., El-Gafy, M., & Lama, P. (2016). A Cloud-based shareable library of cooperative behaviors for Agent Based Modeling in construction. *Automation in Construction*, 62, 89–100. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2015.11.005>
- Eppinger, S. D., & Browning, T. R. (2018). Process Architecture DSM Models. *Design Structure Matrix Methods and Applications.* <https://doi.org/10.7551/mitpress/8896.003.0008>
- Evaluación de 14 puntos DCMA, análisis de calidad del cronograma del proyecto.* (n.d.). Retrieved August 18, 2022, from <https://www.schedulereader.com/blog/dcma-14-point-assessment-project-schedule-quality-analysis/>
- Ezzeddine, A., & García de Soto, B. (2021). Connecting teams in modular construction projects using game engine technology. *Automation in Construction*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103887>
- Fuentes, J., Ruiz, J. P., Valverde, N., & Navarro, E. (2019). Estudio del efecto de la estimación del tiempo y el tamaño del búfer de proyecto en el Método de la Cadena Crítica = Study of the effect of tasks duration and project buffer size estimation in the Critical Chain Method. *Anales de Edificación*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.20868/ade.2019.3910>

- García, J. M. (2006). Aplicaciones prácticas de la Dinámica de Sistemas en un mundo complejo. *Universidad de Puerto Rico*, 1–13.
- Garciandía I., J. A. (Garciandía I. (2011). *Pensar sistémico : una introducción al pensamiento sistémico* (Editorial).
- Gemino, A., Horner Reich, B., & Serrador, P. M. (2021). Agile, Traditional, and Hybrid Approaches to Project Success: Is Hybrid a Poor Second Choice?: *Https://Doi-Org.Ezproxy.Unal.Edu.Co/10.1177/8756972820973082*, 52(2), 161–175.  
<https://doi.org/10.1177/8756972820973082>
- González Sajiúm, D., & De La Rosa, J. M. (2019). Integrando el Scrum a la planificación de proyectos por cadena crítica. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 2(2), 81–130.  
<https://doi.org/10.22206/cyap.2019.v2i2.pp81-130>
- González, V., Alarcón, L. F., & Molenaar, K. (2009). Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects. *Automation in Construction*, 18(2), 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.005>
- Guido, J., Clements, J., Baker, R., Suárez Moreno, M. P., & Sánchez Soto, G. A. (2017). *Administración exitosa de proyectos*. 495.
- Heckbert, S., Baynes, T., & Reeson, A. (2010). Agent-based modeling in ecological economics. In *Annals of the New York Academy of Sciences* (Vol. 1185, Issue 1, pp. 39–53). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05286.x>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Mc Graw Hill Education (Ed.); Sexra edic, Vol. 21, Issue 1).
- Hortigüela Arozamena, D. (2022). *Programación de proyectos mediante cadena crítica . Dimensionamiento de buffer s con simulación de Montecarlo .*
- IBM. (2021). *El modelo de diseño - Documentación de IBM*.  
<https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=networks-neural-model>
- Irwin Lazar. (2022). *Beneficios de la inteligencia artificial en comunicación*. Techtarget.  
<https://www.iac.com.co/beneficios-de-la-inteligencia-artificial-en-la-industria-de-la-construccion/>

- Kerzner, H. (2017). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*.
- Khanzadi, M., Movahedian, A., & Bagherpour, M. (2016). Finding optimum resource allocation to optimizing construction project Time/Cost through combination of artificial agents CPM and GA. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(2), 169–180. <https://doi.org/10.3311/PPci.7883>
- Khodabandelu, A., & Park, J. W. (2021). Agent-based modeling and simulation in construction. *Automation in Construction*, 131(July), 103882. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103882>
- Lappi, T., Karvonen, T., Lwakatare, L. E., Aaltonen, K., & Kuvaja, P. (2018). Toward an Improved Understanding of Agile Project Governance: A Systematic Literature Review. <https://doi.org/10.1177/8756972818803482>, 49(6), 39–63. <https://doi.org/10.1177/8756972818803482>
- Lean Construction Enterprise. (n.d.). *Last Planner - El último planificador*. <http://www.leanconstructionenterprise.com/documentacion/last-planner>
- Lee, J. S., Kwon, N., Ham, N. H., Kim, J. J., & Ahn, Y. H. (2019). BIM-Based Digital Fabrication Process for a Free-Form Building Project in South Korea. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4163625>
- León Daza, W. M. (2020). *Programa integral de incentivos y análisis de la productividad en la industria de la construcción*. 144.
- Mackenzie, N., & Knipe, S. (2006). Research dilemmas: Paradigms, methods and methodology [Electronic Version]. *Issues In Educational Research*, 16(16), 1–11. <http://www.iier.org.au/iier16/mackenzie.html>
- Maheswari, J. U. (2005). *PROJECT Project Scheduling using Dependency Structure Matrix*. 23, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.10.001>
- Maheswari, J. U., & Varghese, K. (2005). Project Scheduling using Dependency Structure Matrix. *International Journal of Project Management*, 23(3), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.10.001>
- Maheswari, J. U., & Varghese, K. (2007). Modeling design iteration using DSM and

- simulation. *Automation and Robotics in Construction - Proceedings of the 24th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 441–446. <https://doi.org/10.22260/isarc2007/0073>
- Mahoma, S., Matta, P., Pikull, P., Rossi, F., & Teo, S. (2020). A New Paradigm for Engineering. *McKinsey & Company, May*, 57–63. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-79937-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-79937-2_5)
- Manzoor, B., Othman, I., Durdyev, S., Ismail, S., & Wahab, M. H. (2021). Influence of artificial intelligence in civil engineering toward sustainable development—a systematic literature review. *Applied System Innovation*, 4(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/asi4030052>
- Mazurkiewicz, I. (2018). *Medium-Sized Enterprise From an Epistemological Perspective*. 64–77.
- Mckinsey Global Institute. (2017). REINVENTING CONSTRUCTION: A ROUTE TO HIGHER PRODUCTIVITY. *McKinsey & Company*. <https://doi.org/10.1080/19320248.2010.527275>
- Mischke, J., Parsons, M., & Barbosa, F. (2017). Improving construction productivity. *McKinsey & Company, June*, 1–6.
- Moradi, S., Nasirzadeh, F., & Golkhoo, F. (2017). Modeling labor productivity in construction projects using hybrid SD-DES approach. *Scientia Iranica*, 24(6), 2752–2761. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4171>
- Morin, E. (1996). *Introduccion al pensamiento complejo*. Gedisa, Barcelona. 108.
- Mujumdar, P., & Maheswari, J. U. (2018). Design iteration in construction projects – Review and directions. *Alexandria Engineering Journal*, 57(1), 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.004>
- Muñoz García, G. A. (2020). *Interoperabilidad en el Entorno BIM: Mejoramiento de los Procesos de Diseño y Comunicación a partir de la Implementación del Concepto OpenBIM*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79163>
- Pérez Castañeira, J. A., Sánchez Suarez, Y., & Sangroni LAnguardia, N. (2021). *Revista Cubana de Administración Pública y Empresarial ANALYSIS OF THE PROJECT*

*FOR THE INSTALLATION OF A STONE. 5.*

PMI. (2021). *PMBOK, 7th edition* (Issue July).

PMI Project Management Institute. (2017). *Guía Práctica de Ágil*.

Poza, J. (2018). *Ciclo de vida de los proyectos: la nueva aproximación de PMBOK (6ª edición) | by Jesús Poza | Blog de astanaPM | Medium*. <https://medium.com/blog-de-astanapm/ciclo-de-vida-de-los-proyectos-la-nueva-aproximación-de-pmbok-6ª-edición-acbb0f91661e>

Qian, Y., ... T. G.-2007 C. I. I. sobre, & 2007, U. (n.d.). Development Projects Scheduling and Design Structure Matrix. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved March 17, 2020, from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4419351/>

R Agarwal, S Chandrasekaran, M. S.-. (2016). *Imagining construction's digital future*. 60(5), 282–283. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future#/>

Rivas-Cedeño, L. L., Mielles-Mielles, L. A., & Bolaño-Valencia, F. R. (2017). *El diseño de proyectos, estudio teórico-conceptual de sus etapas y componentes*. 3, 1189–1205. <https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.esp.3.jul.1189-1205>

Rodriguez, S., Barbosa, Y., Chaparro, & Zaida. (2019). Diseño y construcción de indicadores de gestión para la medición del desempeño de proyectos desarrollados bajo los principios de los marcos de referencia ágiles. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 1–9. <https://doi.org/10.37171/0033-2909.I26.1.78>

Rojas López, M. D. (2017). Administración para ingenieros. *ECOE Ediciones*, 230p.

Rua-Machado, C. A., Ceballos-Rodriguez, E. A., & Rojas-Lopez, M. D. (2022). Enseñanza en gestión de proyectos GP, una propuesta metodológica. *CISCI 2022 - Vigésima Primera Conferencia Iberoamericana En Sistemas, Cibernética e Informática, Decimo Noveno Simposium Iberoamericano En Educacion, Cibernética e Informática - Memorias, Cisci*, 135–140. <https://doi.org/10.54808/CISCI2022.01.135>

Rúa Machado, C. A. (2010). La Planeación Desde la Complejidad. *Universidad Eafit*, 118. [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1150/CarlosAndr%E9s\\_R%FA](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1150/CarlosAndr%E9s_R%FA)

aMachado\_2010.pdf;jsessionid=5B97C18651562C9AF603B1E24C723C20?sequence=1

- Rudeli, N. (2019). *Proyectos de construcción : determinación de causas principales de retraso y desarrollo de modelos estadísticos para la mejora* . 1–218.
- Sakikhales, M. (2022). *Nonlinear Project Management: Agile, Scrum and Kanban for the Construction Industry*. 227–246. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3_10)
- Sakikhales, M. H., Stravoravdis, S., Sakikhales, M. H., & Stravoravdis, S. (2017). Using Agile Project Management and BIM for Improved Building Performance. *Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction*, 65–78. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50346-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50346-2_5)
- Satpathy, T. (2017). Una Guía para el Conocimiento de SCRUM. In *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* (Vol. 44, Issue 8). <https://www.scrumstudy.com/SBOK/SCRUMstudy-SBOK-Guide-3rd-edition-spanish.pdf>
- Sayol, I. (2021). *IA y su aplicación en el sector de la construcción - Ekon*. Cookies. <https://www.ekon.es/blog/ia-aplicacion-sector-construccion/>
- Seresht, N. G., & Fayek, A. R. (2022). Modeling earthmoving operations in real time using hybrid fuzzy simulation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(4), 627–635. <https://doi.org/10.1139/cjce-2020-0790>
- Serrano Machado, D. F. (2022). *La gestión de proyectos desde un enfoque sistémico The management of projects towards a systemic Gerenciamento de projetos a partir de uma abordagem sistêmica*. 7, 1041–1057. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i3.3777>
- Singhal, R., Uma Maheswari, J., Paul C Charlesraj, V., & Pal, A. (2018). MDM-based buffer estimation in construction projects. *IGLC 2018 - Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Evolving Lean Construction Towards Mature Production Management Across Cultures and Frontiers*, 2(August), 1344–1353. <https://doi.org/10.24928/2018/0530>
- Špundak, M. (2014). Mixed Agile/Traditional Project Management Methodology – Reality or Illusion? *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 119, 939–948.

- <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.105>
- Steward, D. V. (1981). DESIGN STRUCTURE SYSTEM: A METHOD FOR MANAGING THE DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS. *IEEE Transactions on Engineering Management, EM-28*(3), 71–74. <https://doi.org/10.1109/TEM.1981.6448589>
- Szczesny, K., & König, M. (2015). Reactive scheduling based on actual logistics data by applying simulation-based optimization. *Visualization in Engineering, 3*(1). <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0020-8>
- Veas, L., & Pradena, M. (2008). El administrador integral de proyectos en la industria de la construcción. *Revista de La Construcción, 7*(2), 47–55.
- Vitorino Bravo, P. A. (2020). *Inteligencia artificial aplicada a la construcción 4.0 - Konstruedu*. <https://konstruedu.com/es/blog/inteligencia-artificial-aplicada-a-la-construccion-4-0>
- Warfield, J. N. (1973). Binary Matrices in System Modeling. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 3*(5), 441–449. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309270>
- Weflen, E., MacKenzie, C. A., & Rivero, I. V. (2022). An influence diagram approach to automating lead time estimation in Agile Kanban project management. *Expert Systems with Applications, 187*, 115866. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2021.115866>
- Winter, R. (2011). DCMA 14-Point Schedule Assessment by Ron Winter, PSP Copyright © January 7, 2011. *First Annual Construction CPM Conference*.
- Yuan, Z., Qiao, Y., Guo, Y., Wang, Y., Chen, C., & Wang, W. (2020). Research on Lean Planning and Optimization for Precast Component Production Based on Discrete Event Simulation. *Advances in Civil Engineering, 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/8814914>
- Zhang, L., & Liu, H. (2021). *Research on Application Strategy of BIM Technology in Construction Project Management. 05002*.