

Gestión gerencial y tecnológica aplicada a la ingeniería de consulta en la
operación/explotación de activos de infraestructura vial

Gustavo Pedraza Jaimes

Tesis para Optar al Título de Doctor en Ingeniería

Director

Jaime Alberto Camacho Pico

Ingeniero Industrial, M. Sc., Ph. D.

Codirector

Hernán Porras Díaz

Ingeniero Civil, M. Sc., Ph. D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías, Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Doctorado en Ingeniería, Área Gestión y Desarrollo Tecnológico

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

En memoria de mis padres, Gustavo y Socorro, y de mi hermano Nelson.

A mi hija María José y a su madre Sonia Lucía.

A mis hermanos Yolanda y Miguel Ángel.

Agradecimientos

Al profesor Jaime Alberto Camacho Pico, Ph.D., Director de Investigación.

Al profesor Hernán Porras Díaz, Ph.D., Codirector de Investigación.

Al grupo de investigación de “Geomática y Optimización de Sistemas”, de la escuela de Ingeniería Civil UIS.

Tabla de contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Introducción | 12 |
| 1. Fundamentación Teórica | 26 |
| 1.1. Ciclo de Vida de los Proyectos de Infraestructura Vial..... | 26 |
| 1.1.1. Planeación y diseño | 26 |
| 1.1.2. Construcción..... | 26 |
| 1.1.3. Operación/Explotación | 26 |
| 1.1.4. Cierre | 27 |
| 1.2. Building Information Modeling – BIM..... | 29 |
| 1.3. Ingeniería de Valor | 40 |
| 1.3.1. Lean Construction Project -LCP- | 42 |
| 1.3.2. Integrated Project Delivery -IPD-..... | 43 |
| 1.4. Gestión de Activos..... | 44 |
| 1.5. Modelos Integrales de Información aplicados a la Gestión de Activos | 54 |
| 1.6. De la Metodología BIM a la Tecnología Digital Twins | 58 |
| 2. Metodología de Investigación | 60 |
| 2.1. Objetivos..... | 60 |
| 2.1.1. Objetivo General..... | 60 |
| 2.1.2. Objetivos Específicos | 60 |
| 2.2. Alcance | 61 |
| 2.2.1. Tipo de Activos | 61 |
| 2.2.2. Operación/Explotación de Activos Viales..... | 62 |
| 2.2.3. Gestión de la Información en el Ciclo de Vida | 72 |
| 2.2.4. Interacción BIM-LC-IPD | 74 |

| | |
|---|-----|
| 2.3. Metodología Design Science Research – DSR..... | 79 |
| 2.3.1. Descripción..... | 79 |
| 2.3.2. Desarrollo | 83 |
| 2.3.3. Producto..... | 84 |
| 3. Modelo Conceptual de Gestión Gerencial y Tecnológica de Activos de Infraestructura Vial | 89 |
| 3.1. Modelo de Negocio de Participación Público-Privada en la Infraestructura Vial | 89 |
| 3.2. Transformación Digital y Gerencia de Activos | 92 |
| 3.3. Tecnología Digital Twins | 98 |
| 3.4. Modelo Conceptual de Gestión de Activos | 100 |
| 3.5. Esquema de Términos de Referencia para Ingeniería Básica del Modelo de Gestión de Activos..... | 109 |
| 3.6. Evaluación del Modelo Conceptual de Gestión | 113 |
| 3.7. Casos de Éxito | 117 |
| 4. Conclusiones..... | 120 |
| 4.1. La importancia de la Gobernanza de Datos..... | 120 |
| 4.2. Aporte al Conocimiento..... | 121 |
| 4.2.1. Aporte al Conocimiento..... | 124 |
| 4.2.2. Aporte a la Gestión Tecnológica | 125 |
| 4.3. Divulgación de la Investigación | 128 |
| 4.4. Beneficios, Limitaciones y Retos | 130 |
| 4.5. Futuras Investigaciones | 133 |
| Referencias Bibliográficas..... | 135 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 Publicaciones sobre Infraestructura y Gestión de Activos | 36 |
| Tabla 2 Elementos, métodos y actividades asociadas a los componentes de un Sistema de Gestión de Activos..... | 53 |
| Tabla 3 Métodos de Evaluación en DSR | 82 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1 Beneficios de BIM en las etapas del ciclo de vida de las edificaciones..... | 17 |
| Figura 2 Modelo Integral de Información y Modelo Tradicional en las Etapas del Ciclo de Vida | 28 |
| Figura 3 Campos de información BIM | 30 |
| Figura 4 Procesos de diseño tradicional vs. Procesos de diseño con Modelos Integrales como BIM..... | 33 |
| Figura 5 Dimensiones BIM..... | 34 |
| Figura 6 Grupos de Temas de la Gestión de Activos. IAM, Institute of Asset Management.. | 45 |
| Figura 7 Componentes de un Sistema de Gestión de Activos | 52 |
| Figura 8 Modelos integrales de información en el contexto de la gestión de activos y el marco organizacional..... | 55 |
| Figura 9 Niveles del manejo de la información para la toma de decisiones..... | 62 |
| Figura 10 Ciclo de vida de un proyecto de infraestructura con enfoque de economía circular | 63 |
| Figura 11 Representación gráfica de las pérdidas de datos durante el tiempo de vida de una infraestructura | 64 |
| Figura 12 Ciclo de vida total en la Gestión de Activos | 67 |
| Figura 13 Esquema EPC y O/O en el modelo APP. | 74 |
| Figura 14 Integración BIM, LC e IPD en la Gestión de Activos..... | 76 |
| Figura 15 Interacción BIM, LC e IPD | 78 |
| Figura 16 Proceso de la metodología Design Science Research | 80 |

| | |
|--|-----|
| Figura 17 Elementos a integrar en la Gestión de Activos..... | 87 |
| Figura 18 PPP Models | 91 |
| Figura 19 Estructura de un modelo de Digital Twins | 105 |
| Figura 20 Diseño Conceptual de la Gestión Gerencial y Tecnológica de Activos Viales..... | 107 |
| Figura 21 Evolución del Modelo de Gestión de Activos durante el Ciclo de Vida..... | 110 |
| Figura 22 Enfoque Incremental de las Funcionalidades del Modelo de Gestión de Activos | 112 |

Abreviaciones

AIA: American Institute of Architects

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

BIM: Building Information Modeling

BAM: Building Assembly Modeling

BOOM: Building Operate Optimization Modeling

CAPEX: Capital Expenditure

IAM: Institute of Asset Management

IPD: Integrated Project Delivery

LC: Lean Construction

LCC: Life Cycle Costing

LCI: Lean Construction Institute

OPEX: Operational Expenditures

PMI: Project Management Institute

SGA: Sistema de Gestión de Activos

WRA: World Road Association. (PIARC)

PIARC: Permanent International Association of Road Congresses

Resumen

Título: Gestión gerencial y tecnológica aplicada a la ingeniería de consulta en la operación/explotación de activos de infraestructura vial*

Autor: Gustavo Pedraza Jaimes**

Palabras Clave: Smart Roads, Digital Twins, Gestión de Activos Viales, Gestión de Inversiones en Negocios PPP

Descripción:

La investigación reconoce la importancia de la infraestructura vial en el desarrollo económico y social de los países. Estos proyectos son intensivos en capital y ciclo de vida extenso; su etapa de operación/explotación es compleja de gerenciar, producto de la asimetría de información durante las etapas del horizonte económico, tal novedad constituye el problema a resolver en la gestión de activos.

La solución a nivel de diseño conceptual incorpora los modelos integrales de información y la tecnología “Digital Twins” junto a los algoritmos de inteligencia artificial e industria 4.0, que permite optimizar el proceso de decisiones estratégicas. Entonces, se parte de la actual coyuntura de transformación tecnológica del sector de infraestructura, como espacio para plantear un modelo de gestión gerencial y ofrecer un entorno de toma de decisiones informadas a todos los agentes/actores.

Este reto tecnológico se asume con la metodología “Design Science Research” para modelar un esquema empresarial que propenda por fortalecer los procesos misionales, como respuesta a los riesgos de gobernanza de información de activos viales, en los modelos de negocio de Participación Público-Privada, bajo la modalidad de “Project Finance”.

La integración tecnológica propuesta maximiza la generación de valor de las instalaciones, en términos económicos, sociales y desarrollo sostenible, con el objetivo final de mejorar la calidad de vida de las personas. El diseño conceptual proporciona una base de conocimiento para la Ingeniería Básica del modelo y avanzar en el paradigma de “Smart Roads”, en correspondencia con los lineamientos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías, Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jaime Alberto Camacho Pico. Ingeniero Industrial, M. Sc., Ph. D. Codirector: Hernán Porras Díaz. Ingeniero Civil, M. Sc., Ph. D.

Abstract

Title: Technological management and direction applied to consulting engineering in the operation/exploitation of road infrastructure assets.*

Author(s): Gustavo Pedraza Jaimes*

Key Words: Smart Roads, Digital Twins, Gestión de Activos Viales, Gestión de Inversiones en Negocios PPP

Description: The research recognizes the importance of road infrastructure in the economic and social development of countries. These projects are capital intensive and have a long-life cycle; Its operation/exploitation stage is complex to manage, due to information asymmetry during the stages of the economic horizon; such novelty constitutes the problem to be solved in asset management.

The solution at the conceptual design level incorporates comprehensive information models and “Digital Twins” technology along with artificial intelligence and industry 4.0 algorithms, which allows optimizing the strategic decision process.

Then, based on the current situation of technological transformation of the infrastructure sector, a business management model is proposed that offers an environment for making informed decisions to all agents/actors.

This technological challenge is assumed with the “Design Science Research” methodology to model a business scheme that tends to strengthen missional processes, in response to the risks of information governance of road assets, in Public-Private Partnership business models, under the “Project Finance” modality.

The proposed technological integration maximizes the generation of value of the facilities, in economic, social, and sustainable development terms, with the ultimate objective of improving people's quality of life. The conceptual design provides a knowledge base for the Basic Engineering of the model and advance in the “Smart Roads” paradigm, in correspondence with the guidelines of the Sustainable Development Goals.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías, Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jaime Alberto Camacho Pico. Ingeniero Industrial, M. Sc., Ph. D. Codirector: Hernán Porras Díaz. Ingeniero Civil, M. Sc., Ph. D.

Introducción

El sector de infraestructura no es muy propenso a recibir e implementar con buena capacidad de respuesta las innovaciones tecnológicas, seguramente por las implicaciones y riesgos de corto plazo que se deben asumir por esos cambios y avances en el conocimiento aplicado a la industria. En particular, con el desarrollo de los modelos integrales de información de proyectos, se han ampliado las posibilidades de utilización de estos novedosos sistemas - *que han sido aplicados fundamentalmente en procesos técnicos de diseño y construcción*- a las áreas gerenciales de gestión de proyectos y en las etapas de operación/explotación y de cierre de proyectos.

A nivel general, las cuatro etapas principales de un proyecto de infraestructura comprenden la planeación y diseño, la construcción, la operación/explotación y el cierre/terminación; bajo un concepto de *economía circular*, consistente en un ciclo continuo de desarrollo positivo que conserva y transforma los activos de infraestructura, en condiciones apropiadas de sostenibilidad, optimizando el uso de los recursos y minimizando los riesgos del sistema en su vida económica hasta su culminación. Pues bien, hasta ahora los modelos de información se han empleado con éxito y en forma frecuente en las etapas de planeación y diseño y de construcción, dejando de lado la introducción e implementación de estas innovaciones en las etapas posteriores del ciclo de vida de los proyectos, como la operación/explotación y el cierre. De igual manera, los nuevos modelos integrales están transitando hacia los niveles gerenciales de gestión de proyectos, abriendo una gran expectativa sobre la optimización de los procesos de toma de decisiones y a su turno permitiendo obtener mayores beneficios sociales y mejores resultados económicos sobre las inversiones.

En estas circunstancias, el importante reto que puede plantearse con los novedosos modelos integrales de información consiste en dos direcciones, de manera horizontal al

promover y contribuir con su aplicación en las etapas de operación/explotación y de cierre de proyectos, privilegiando el manejo escalable, acumulado y continuo de la información; y de otro lado, en sentido vertical, al elevar su utilización a niveles de gestión gerencial y tecnológica en las cuatro etapas mencionadas del ciclo de vida de los proyectos.

Ahora bien, estas innovaciones tecnológicas emergen dentro de un contexto muy particular en la industria de la construcción de infraestructura, caracterizado por un factor coyuntural asociado con las crisis económicas recientes de fin de los años noventa y de la segunda mitad de la primera década del presente siglo, que afectó notablemente al sector inmobiliario, a la industria de la construcción, y a la economía mundial; pero también, a un elemento estructural e intrínseco relacionado con su sistema productivo predeterminado a mantener el *statu quo* con poco espacio para adaptarse prontamente a los cambios tecnológicos (Choclán et al., 2014).

De otro lado, también es fundamental mencionar los enormes requerimientos de inversión y de fuentes de financiación para atender las necesidades crecientes del desarrollo del sector de infraestructura, además de las dificultades de la planificación a largo plazo y la problemática inherente de la industria a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de los activos y con mayor intensidad en la operación/explotación *-falta de tecnología, sobrecostos, incumplimientos de los contratos, carencia de regulación económica, insuficiente información para toma de decisiones, deficiente nivel de servicio, y compleja asignación y atención de riesgos (institucionales, económicos, financieros, de mercado, operacionales, ambientales, entre otros)-*, en particular en países en desarrollo; y un asunto de especial connotación dentro del estado actual de la gestión se debe conceder al ejercicio poco transparente en el uso de los recursos públicos como fuente de financiación de la conservación y expansión de la infraestructura vial.

No obstante, históricamente el sector ha ejercido como un indicador de crecimiento económico, como quiera que explica en parte el progreso de un país y su nivel de desarrollo social, fundamentalmente por su importante contribución al PIB y a la masiva generación de empleo (alrededor del 10% del PIB mundial y el 7% de empleo de la población) (Fuentes, 2014).

Para enfrentar los nuevos desafíos, surge el concepto *Building Information Modeling* - BIM como propuesta contemporánea de un modelo de información para la construcción, que comprende la coordinación de diferentes tecnologías en el desarrollo de proyectos con el objeto de lograr mayor competitividad y mejores beneficios en el sector. Durante su aplicación y evolución reciente, BIM ha demostrado que supera ostensiblemente los métodos tradicionales de gestión de la información, en las etapas de diseño y construcción, reduciendo los recursos y costos para alcanzar finalmente mejores resultados económicos de los proyectos, y en términos agregados permitiendo administrar menores niveles de riesgos y aumentando la productividad de la industria.

En tal sentido, habiendo evidenciado las bondades de este Modelo Integral de Información (Azhar et al., 2007), el cambio tecnológico es inevitable, conveniente y apremiante, mediante la transformación del conocimiento aplicado para integrar diversas disciplinas y distintos actores hacia la innovación en la Gestión de Activos, en las dos direcciones previamente enunciadas: en la implementación en todas las etapas del ciclo de vida *-específicamente en el período de operación/explotación-* y en la optimización del proceso de toma decisiones a nivel gerencial.

La presente investigación, reconoce la importancia fundamental de la infraestructura vial *-dentro de la industria de la construcción-* en el desarrollo económico y social de los pueblos. En efecto, parte del progreso de la economía mundial desde el siglo XVI se explica por

la aparición del ferrocarril como medio de transporte, que permitió las relaciones comerciales entre la producción y el consumo en las naciones desarrolladas, e igualmente la movilización de la fuerza laboral requerida por las empresas en los distintos centros industriales de bienes y servicios. Más tarde, al finalizar la segunda guerra mundial se realizaron grandes inversiones en infraestructura vial en los países desolados por el conflicto bélico, como medio para impulsar la demanda agregada y por ende el producto interno bruto, propiciando la recuperación económica de estos territorios.

En la actualidad, la industria de la construcción de infraestructura vial tiene extraordinario impacto sobre la eficiencia de los mercados *-por precios y economías de escala-* y el desarrollo e integración de los sectores productivos. En ese sentido, la importancia de la inversión en infraestructura vial radica en que constituye un factor determinante en el nivel de competitividad y de progreso económico y social de los países.

Los proyectos de infraestructura vial son intensivos en capital, con un efecto expansionista sobre la actividad económica, tanto de corto como de largo plazo; por un lado, las inversiones en las etapas de diseño y construcción generan impactos asociados al corto plazo y de orden coyuntural, mientras en la etapa de operación/explotación de los sistemas viales sus procesos y los resultados son de naturaleza permanente y cubren un horizonte de largo periodo, relacionado con la vida económica del activo de infraestructura.

Las agencias estatales, los inversionistas y los operadores de infraestructura utilizan la información de los proyectos de desarrollo y de sus activos operativos para tomar decisiones acertadas sobre el ciclo de vida de las instalaciones que conforman un bien o servicio de uso público. Con este objetivo, los modelos integrales de gestión ofrecen información de calidad para optimizar el proceso de toma de decisiones en los negocios. En estos modelos, la información es más estructurada, confiable, continua, consolidada y reutilizable, lo que permite

a los equipos de dirección obtener niveles superiores de productividad con las soluciones gerenciales tomadas durante el ciclo de vida de la infraestructura y lograr mayor funcionalidad, rentabilidad y sostenibilidad en la Gestión de Activos.

De igual forma, la información de la infraestructura con los modelos integrales puede ser escalada, acumulada y transferida a través de todo el horizonte de vida económica, permitiendo reducir las costosas operaciones de reproceso y redundancias en el tratamiento de la información. En particular, la transparencia, objetividad y visión de la información del ciclo de vida de los activos de instalaciones viales posibilita la integración con estándares e indicadores del sector, al igual que fácilmente asimila los nuevos cambios de procesos y tecnologías emergentes, y en consecuencia su aplicación puede ser generalizada en esta industria (Sleiman y Burdi, 2015).

La etapa de operación/explotación de proyectos viales es bastante compleja de gerenciar, en cuanto a tiempo, recursos, costos, riesgos e impactos sobre el ecosistema; sin embargo, los innovadores modelos integrales de gestión de la información con un enfoque tecnológico colaborativo y mayores facilidades gerenciales, admiten atender esta problemática al mejorar el proceso de toma de decisiones, en este caso en especial durante el periodo de servicio o funcionamiento de los activos de infraestructura vial.

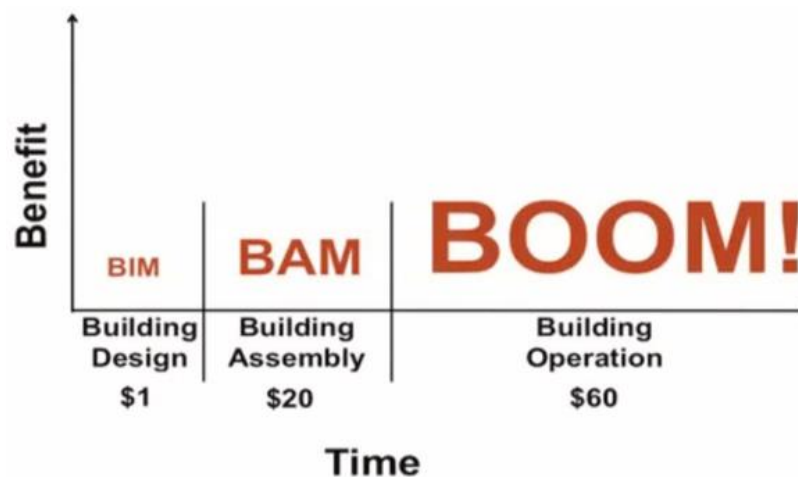
Como se ha expresado hay cuatro etapas principales en el ciclo de vida de los proyectos - *planeación y diseño, construcción, operación/explotación y cierre*-, de acuerdo con algunos autores (MacLeamy, W. Hass, E. Bogado, F. Calcagno) la denominación de los modelos integrales está recientemente asociada con el avance de estas etapas; por ejemplo, en la planeación y diseño nominalmente se describe como un Modelo de Información para Construcción -BIM-, en la ejecución propiamente dicha se conoce como un Modelo de Información de Ensamble durante la construcción -BAM-, y en la etapa de

operación/explotación se denomina -BOOM- Modelo de Operaciones y Optimización de la Infraestructura. No obstante, para los efectos de la presente investigación, la referencia al Modelo Integral de Información se identificará como BIM, independientemente de la etapa de aplicación en el horizonte de vida del proyecto de infraestructura vial.

En cuanto a los beneficios de los Modelos Integrales de Información en las diferentes etapas del ciclo económico de los proyectos se puede indicar que son muy evidentes y apreciables. En especial, para ilustrar los beneficios que ofrece BIM, Patrick MacLeamy, director de la empresa HOK, hace mención del acrónimo “BIM-BAM-BOOM” a fin de estimar la utilidad en los tres primeros periodos del ciclo de vida de las edificaciones (**Figura 1**). Una interpretación por simple analogía permitirá una aproximación conceptual para el caso de la aplicación de BIM en la gestión de activos de infraestructura vial.

Figura 1

Beneficios de BIM en las etapas del ciclo de vida de las edificaciones



Nota. La figura muestra la utilidad en los tres primeros periodos del ciclo de vida de las edificaciones. Tomada de The Future of the Building Industry: BIM-BAM-BOOM! por Karissa Rosenfield, 2012, ArchDaily.

MacLeamy afirma acerca de la Figura 1, lo siguiente “De forma representativa sugiere que por cada dólar que se invierte en la fase de diseño, se gastan otros 20 adicionales en la etapa constructiva de un proyecto y 60 más durante la operación y el mantenimiento del mismo por alrededor de 50 años. BIM, en este sentido, ayuda a que desde un inicio se establezcan acuerdos que no repercutan en malas ejecuciones”. La acción colaborativa de todos los agentes o partes interesadas sugiere mayor y efectivo control en todo el ciclo de vida.

En relación con la etapa de construcción o de “ensamblaje”, MacLeamy indica que en el proceso de construcción de los proyectos los contratistas y/o proveedores fundamentalmente integran todo un sistema por medio de productos previamente fabricados que llegan al lugar de localización del proyecto. En la práctica, los contratistas ensamblan los diferentes componentes para dar lugar al “Building Assembly Modeling” - BAM -, “es decir, la elaboración de un modelado de ensamblaje de edificaciones, que en la etapa de construcción apoya a la coordinación entre los subcontratistas y a las funciones de control de costos. Esto para asegurar que el valor constructivo sea menor a 20 veces el valor de diseño”.

El experto afirma que un contratista/constructor que utiliza el BIM y el BAM para diseñar y “ensamblar” una edificación “puede ahorrar hasta un 30 por ciento de los costos de construcción”. Al pasar a la siguiente etapa de operación/explotación del inmueble, propone Patrick MacLeamy el término “Building Operation Optimization Modeling” -BOOM-, es decir, la ‘optimización del modelo de operación’ permite que las primeras dos etapas mejoren los costos de operación/explotación, preferentemente de consumo energético y de mantenimiento. “Al decir que esta etapa es 60 veces el valor de la correspondiente al diseño, previamente mencionada, los ahorros llegan a ser extremadamente significativos, pagándose por sí solo el diseño de la primera etapa”.

En conclusión, MacLeamy demuestra que “más vale invertir en BIM, que pagar por los miles de errores que podrían presentarse durante las siguientes dos etapas” (V. Harris, 2016; S. Quintanilla, 2015).

A nivel mundial, los Modelos Integrales de Información continúan profundizando y ampliando su aplicación, en ese sentido la metodología BIM surge como nuevo estándar en proyectos de infraestructura exigible como requisito tecnológico dentro las licitaciones públicas, en diferentes países de Europa, en USA y Canadá, y con perspectiva inmediata de ampliar su aplicación a nivel global, con el fin de obtener mayores beneficios económicos al disminuir tiempos, reducir costos y aumentar la eficiencia y la transparencia en los proyectos públicos.

Ahora bien, en un informe sobre el sector de infraestructura vial se afirma que en “Latinoamérica la inversión en este sector es 35% menos de la requerida” (Agdas & Ellis, 2019), y en tal circunstancia con la implementación de BIM seguramente se reduciría esta brecha, en razón a los importantes ahorros que se lograrían y, por ende, al optimizar los recursos para estas inversiones. Una estimación consignada en el referido documento expresa que “los diseños deficientes son responsables del 40% de los cambios durante la construcción de infraestructura y del incremento de su costo total”. En consecuencia, con la utilización de BIM se podrían controlar los plazos de construcción, evitar las ampliaciones y prórrogas en contratos y los sobrecostos correspondientes.

Los beneficios se pueden extrapolar a la etapa de operación/explotación de la infraestructura de transporte, pues la información integral y consolidada del proyecto en las etapas previas de diseño y construcción será la base para la toma de decisiones sobre la operación y mantenimiento del activo vial, y en tales condiciones se facilitará la gestión gerencial al reducir costos y optimizar los resultados.

En esta dirección, los organismos multilaterales de crédito como el Banco Interamericano de Desarrollo -BID- están orientando sus acciones a la incorporación de BIM en las etapas de diseño y construcción de los proyectos de infraestructura que financian. E igualmente, en la formulación de políticas públicas, apoyará a los países en reformas normativas y regulatorias para la adopción del BIM en las etapas de construcción/ejecución y de operación/explotación de proyectos.

Para ilustrar precisamente los evidentes beneficios derivados de la aplicación de los Modelos Integrales de Información en todas las etapas del ciclo de vida de los proyectos y/o activos de infraestructura *-en general en todos los sectores-*, se puede partir de la hipótesis que de la totalidad de los costos (100%) en la vida económica del activo los montos de inversión asociados a las etapas de diseño y de construcción representan aproximadamente un 20% (en un rango de 16% a 22%), y los costos de la etapa de operación/explotación corresponden alrededor del 80%, es decir 4 veces la inversión total previa a la puesta en servicio de las instalaciones. (J. Bravo et al., 2015; R. Evans, 1998)

En consecuencia, si la vida útil promedio de un activo de infraestructura es de más de 50 años, la gestión de activos comprendería todas las actividades relacionadas con su operación y mantenimiento, y de esta forma las decisiones gerenciales sobre el funcionamiento de la infraestructura tendrían un significativo impacto asociado con el costo de esta etapa que es equivalente a 4 veces la suma de la inversión realizada en los periodos precedentes de diseño y construcción.

En realidad, con un modelo BIM para gestión de activos de infraestructura vial cada elemento o componente tiene asociada la información requerida para facilitar la toma de decisiones por parte de la gerencia, por ejemplo, acerca del mantenimiento operativo versus la reposición del elemento/componente en análisis. En conclusión, la metodología de los Modelos

Integrales se fundamenta en la administración eficiente de la información como objeto central en todo el ciclo de vida de las instalaciones, produciendo amplios beneficios en la gestión de activos de infraestructura, al optimizar la utilización de recursos y obtener mejores resultados económicos y sociales (Gómez, 2016) y (Hardin & McCool, 2016).

En términos específicos, los modelos integrales de información de naturaleza paramétrica usan datos (números o características) para valorar un elemento y/o determinar el comportamiento de una entidad gráfica y definir las relaciones entre los componentes del modelo, logrando elementos o piezas dinámicas que facilitan su edición, a diferencia de “objetos definitivos”. Esto significa que los criterios o la idea/intención de diseño podían capturarse y mantenerse durante el proceso de modelado, además de permitir el escalamiento y consolidación de la información en el desarrollo de todas las etapas del ciclo de vida de la infraestructura. Precisamente este concepto es la gran innovación de un modelo de diseño digital con elementos paramétricos.

En la práctica, estos datos y las relaciones de los objetos afectan la geometría de los elementos, lo que convierte los datos en "parámetros" y el símbolo del objeto en "paramétrico". En la misma forma, al introducir las relaciones básicas entre los elementos, se construye una red de vínculos y conexiones entre todos los elementos que conforman la infraestructura y/o activo.

En estas condiciones, un modelo de información paramétrico combina un modelo de datos y relaciones (gestión de información), con un modelo de comportamiento (gestión de cambios/modificaciones), de forma integrada “donde todo es paramétrico y todo está interconectado”.

En resumen, el modelo integral de información con elementos paramétricos se caracteriza por la auto coordinación de la información en tiempo real en cada una de las

versiones del modelo. “En virtud a la condición de asociatividad bidireccional entre todos los componentes, la propagación total e inmediata de los cambios tiene como resultado un ‘modelo de información’ coherente, fiable y de alta calidad” (Albornoz, 2018).

Los modelos integrales de información, aplicados a la gestión de activos, se convierten en la innovación tecnológica a emplear en las etapas de planificación y diseño, construcción, operación/explotación y de cierre, de las nuevas instalaciones de infraestructura, con la finalidad de poder garantizar los objetivos estratégicos de optimizar la generación de valor.

De esta manera, los modelos de información deben facilitar el cumplimiento de los beneficios que la gestión de activos puede aportar a los inversionistas y a las diferentes partes/agentes interesados; particularmente, a mejorar el desempeño financiero, procurar las decisiones de inversión en activos basadas en información, gestionar el riesgo, mejorar las operaciones y los servicios, promover la responsabilidad social empresarial y lograr la sostenibilidad organizacional con mayores niveles de eficiencia y eficacia de sus activos.

Así las cosas, la gestión de activos basada en modelos integrales de información tiene una visión holística del proceso de toma de decisiones, puesto que considera totalmente el ciclo de vida de los activos, dejando de lado la percepción sólo parcial de cada etapa. La práctica habitual es absolutamente contraria, pues la toma de decisiones de muchos inversionistas y gestores de activos está focalizada únicamente en seleccionar las opciones de inversión pensando en la solución más económica a corto plazo, sin estudiar las implicaciones en todo el ciclo de vida de las instalaciones físicas. Esta visión cortoplacista se materializa en una situación de asimetría de información que los stakeholders soportan a través de las etapas del ciclo de vida, por la pérdida sistemática de contenido y calidad de la documentación de análisis, tal novedad se identifica como el problema principal a resolver de la gestión gerencial de activos.

La persistencia de este enfoque de corto plazo puede conducir a un riesgo mayor en el proceso de toma de decisiones a los inversionistas y gestores de activos, al eventualmente concebir planes de negocios totalmente distorsionados que resulten en acciones improvidentes y contraproducentes con los objetivos empresariales y a caer en incumplimiento de los requerimientos funcionales, de calidad, costo y plazo del servicio con los usuarios finales.

En términos aún más descriptivos, el contexto resolutivo y de amplio impacto de la gestión de activos de infraestructura vial requiere de instrumentos gerenciales de características, especificaciones y condiciones de adaptabilidad para atender la dinámica natural del entorno de los negocios, y también hace sentido proporcionar una solución a la problemática observada a lo largo de las etapas del ciclo de vida explicada por la asimetría de información derivada de la pérdida sistemática del nivel calidad y cantidad, fragmentación temporal de las decisiones en el horizonte económico, ausencia de ambiente colaborativo entre los agentes/stakeholders por su desempeño independiente y de autodeterminación, y la apremiante atención de los riesgos organizacionales.

Ante esta premisa, la presente investigación pretende obtener un modelo conceptual de gestión de activos incorporando los modelos integrales de información a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de la infraestructura, aprovechando el alcance de la dimensión “7D” ofrecida por Building Information Modeling correspondiente a la gestión de activos, para facilitar el proceso de toma de decisiones a nivel gerencial con el propósito de maximizar la generación de valor de las instalaciones, en cumplimiento de los objetivos empresariales y sociales.

Las facilidades de los Modelos Integrales de Información pueden ser complementadas con dos nuevas metodologías de gestión bajo el concepto de Ingeniería de Valor (Save, 2019), para obtener mayores niveles de eficiencia y eficacia en la gerencia de proyectos. De forma

singular, para el caso de la presente investigación, una de éstas metodologías es el modelo *Integrated Project Delivery -IPD-* (Azhar et al., 2014), que fundamentalmente busca alinear objetivos, estrategias y prácticas, en un enfoque colaborativo y de integración de todos los actores involucrados en las diferentes etapas del ciclo de vida de los proyectos de infraestructura vial (Esther Paik et al., 2017), con el fin de reducir tiempos y costos en las actividades, a la vez que contribuye a optimizar el proceso de toma de decisiones. En esa misma línea, la otra filosofía metodológica es *Lean Construction -LC-* (Alarcón y Pellicer, 2009) que se enfoca en la gestión de proyectos de construcción de infraestructura *-vertical y lineal-* siguiendo los principios del mejoramiento continuo, que incrementan la productividad de los procesos constructivos y de los procesos de operación/explotación de estos sistemas, al minimizar las pérdidas y maximizar el valor del producto/servicio final (J.Narváez, 2013; H. Porras et al., 2014; Sacks et al., 2010).

Sin duda, estamos presenciando una transformación del sector de infraestructura en cuanto a movilidad de información, conocimiento y experiencia, hacia un innovador modelo de gestión gerencial en los proyectos de inversión. La presente investigación pretende hacer parte de este proceso de desarrollo tecnológico con el propósito que la información esté disponible a todos los tipos de actores e interesados, en particular en la etapa de operación/explotación, para la gestión de activos de infraestructura vial dentro de marco de la familia de normas ISO 55000, expedida en enero de 2014. En consecuencia, existe una oportunidad y conveniencia para transformar tecnológicamente el sector, mediante la contribución al conocimiento existente en el área de gerencia de proyectos.

Para asumir esta especial circunstancia, la Ingeniería de Consulta como disciplina que a partir de su actividad intelectual entrega la tecnología al servicio de la sociedad, como bien lo establece la Federación Panamericana de Consultores -FEPAC-, debe liderar y encargarse de

absorber este innovador conocimiento agregado a la gestión gerencial y tecnológica de activos de infraestructura vial, en particular a través de su concurso al sector público y privado en la implementación del nuevo modelo de información en la etapa de operación/explotación del ciclo de vida económica de estos activos.

En tal sentido, la investigación apunta a enfrentar este importante reto de innovación tecnológica para obtener un diseño conceptual de un Modelo Integral de Gestión de Activos de Infraestructura Vial, en la etapa de operación/explotación, mediante la asistencia de la Ingeniería de Consulta en la definición de su alcance para su implementación, que permita incorporar los avances tecnológicos a partir de *Building Information Modeling* -BIM- con las nuevas metodologías de Ingeniería de Valor, como *Lean Construction* -LC- e *Integrated Project Delivery* -IPD-, a fin de facilitar y optimizar el proceso de Gestión de Activos de Infraestructura Vial.

1. Fundamentación Teórica

1.1. Ciclo de Vida de los Proyectos de Infraestructura Vial

Un proyecto de infraestructura vial se concibe como el conjunto de componentes físicos que interrelacionados entre sí de manera coherente y bajo cumplimiento de ciertas especificaciones técnicas, ofrecen condiciones cómodas y seguras para la circulación y movilidad de los usuarios que hacen uso de esas instalaciones. El ciclo de vida de proyectos de infraestructura vial se compone de las siguientes etapas: planeación y diseño, construcción, explotación/operación y cierre, definidas de la siguiente manera (H. Díaz et al., 2014; Sözüer y Spang, 2012).

1.1.1. Planeación y diseño

Se entiende como el conjunto de actividades relacionadas con la determinación de metas, estrategias, programas, métodos, procedimientos, productos y/o servicios *–incluyendo la definición de sus características y especificaciones técnicas, cantidades, costos e igualmente la estructuración del proyecto–*, en lo correspondiente a mejoramiento, rehabilitación, construcción, explotación/operación y conservación de infraestructura vial, como primera etapa en la evolución de los proyectos de inversión de esta naturaleza.

1.1.2. Construcción

La etapa de construcción que va muy relacionada con la planeación y el diseño del proyecto *–incluyendo la programación de actividades–*, se puede considerar como la organización, métodos, procesos y procedimientos que permiten la gestión de los recursos y sistemas constructivos con la finalidad de obtener un producto o servicio, en este caso el activo de infraestructura vial.

1.1.3. Operación/Explotación

Definida como el conjunto de actividades a realizar cuando el activo se encuentra en servicio o en funcionamiento, es decir, que la unidad productiva instalada inicia la generación del producto o prestación del servicio, para el cumplimiento del objetivo específico definido en la etapa de planeación y diseño.

La etapa de operación/explotación se compone de las siguientes fases:

- **Análisis de la Situación Actual:** Realizando un inventario de los recursos disponibles y determinando su estado, el uso que se hace de los mismos y el rendimiento obtenido, en calidad del servicio y/o costos.
- **Análisis de la Situación Futura:** Desarrollando métodos, técnicas y modelos que permitan estudiar el comportamiento futuro del sistema vial y prever su respuesta ante posibles requerimientos en todo el horizonte de explotación económica.
- **Opciones para Alcanzar el Objetivo Establecido:** Analizando los resultados obtenidos al aplicar los modelos y métodos desarrollados en la fase anterior, es necesario definir el conjunto de opciones e igualmente realizar la evaluación de estas alternativas de solución.
- **Selección de la Opción más Conveniente:** Tomando como base los análisis de la fase previa, se procede a identificar la mejor solución indicando sus características y especificaciones.
- **Ejecución de la Solución:** A partir de la programación de las actividades necesarias para implementar la alternativa de solución seleccionada, será preciso acometer su puesta en operación, efectuando un control y seguimiento de su evolución y de los resultados obtenidos, introduciendo las modificaciones que se consideren oportunas.

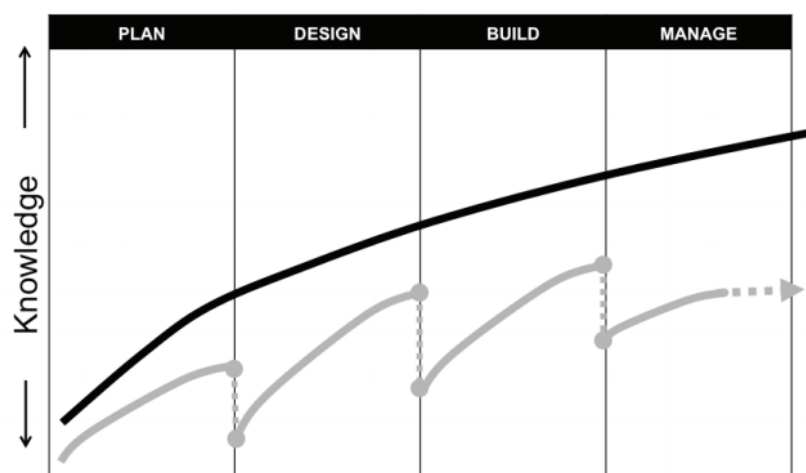
1.1.4. Cierre

Se concluye el proyecto y se cierran las relaciones contractuales. Al efecto, se elaboran los documentos con los resultados finales, archivos, cambios, directorios, evaluaciones y lecciones aprendidas. Finalmente, las actividades en cada etapa del ciclo de vida de la infraestructura vial deberán ser documentadas mediante la redacción de las acciones correspondientes, para consignar cada elemento de la actuación, los medios y recursos, los resultados y el presupuesto, debiendo ser el documento preceptivo del personal encargado de ejecutar esas actividades.

En la **Figura 2** se puede observar la práctica tradicional de pérdida sistemática de información y conocimiento a través de las diferentes etapas, en virtud de la falta de continuidad y coordinación en la gestión de la documentación, con las consecuencias inherentes sobre el control de los procesos y la toma de decisiones acerca del desarrollo del proyecto. De otra parte, también se muestra que con la aplicación de Modelos Integrales de Gestión se conserva, escala y acumula la información de manera continua a lo largo del ciclo de vida del activo de infraestructura.

Figura 2

Modelo Integral de Información y Modelo Tradicional en las Etapas del Ciclo de Vida



Nota. La figura muestra la práctica tradicional de pérdida sistemática de información. Tomada de BIM for Infrastructure: A vehicle for business transformation (p. 9), por N.O. Anderson, 2012,

Semantic Scholar.

1.2. Building Information Modeling – BIM

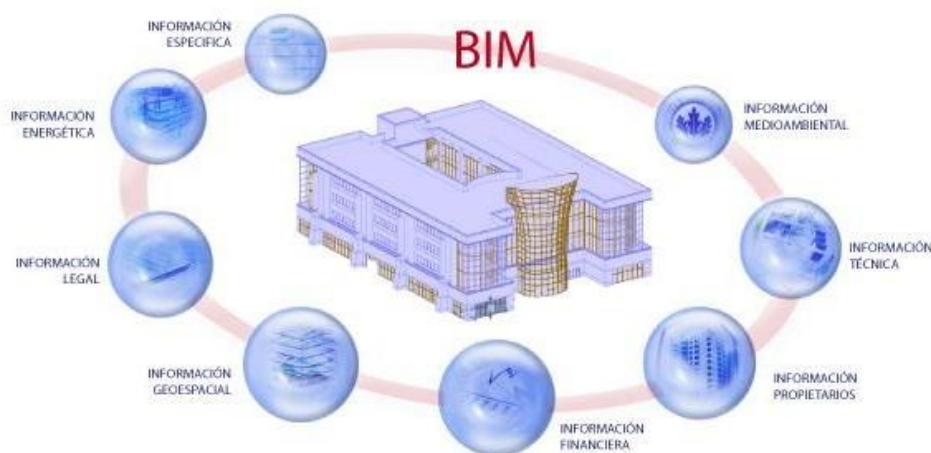
Por primera vez el concepto BIM se menciona en la publicación “AIA Journal” por Charles M. “Chuch” Eastman en 1975 (Sözüer y Spang, 2012) en donde nombró un concepto llamado “Building Description System”, que se relaciona con el acrónimo BIM como se conoce hoy en día la metodología “Building Information Modeling”. No obstante, quien introdujo más tarde al mercado esta novedad tecnológica, en principio como un nuevo modelo de representación digital de procesos de construcción, fue Jerry Laiserin en 2002.

En su evolución reciente, aparecen varios conceptos complementarios en su definición. En primer lugar, BIM proviene del acrónimo de la frase inglesa “Building Information Modeling” (Modelado de información de una edificación/construcción); por tanto, se refiere a la creación y uso de información virtual, generada de manera coordinada y con coherencia acerca de un proyecto de infraestructura en todas las etapas de su ciclo de vida *-desde la planeación y diseño para continuar con la ejecución/construcción, siguiendo con el periodo de operación/explotación y finalmente la etapa de cierre-*. Entonces, precisando estos conceptos es válido indicar de forma general que BIM es el “Modelado de Información para la Construcción de Infraestructura” consistente en un proceso continuo y sistémico que parte de la formulación de un modelo de diseño 3D inteligente para posteriormente facilitar la coordinación, simulación, visualización, administración y gestión del proyecto o activo, y así colaborar con los *stakeholders* (**Figura 3**) a mejorar el proceso de toma de decisiones y contribuir a la manera de planificar y diseñar, construir y operar/explotar proyectos y/o activos de infraestructura, hasta el cierre de su ciclo económico.

Desde la perspectiva de un enfoque moderno, BIM es un sistema gerencial de información de contenido interdisciplinario -como se aprecia en la Figura 3-, que introduce la descripción y representación digital de las características físicas y funcionales de un proyecto de infraestructura y permite simular el desempeño de éste en todas las etapas de su ciclo de vida, con el objeto de facilitar la gestión gerencial y obtener mejores resultados en los diferentes procesos.

Figura 3

Campos de información BIM



Nota. La figura muestra que el BIM es un sistema gerencial de información de contenido interdisciplinario. Tomada de argolaarquitectos.com (<http://argolaarquitectos.com/web/wp-content/uploads/2012/09/esquema-bim.png>).

El modelado integral de información de construcción se ha empleado principalmente en proyectos de edificaciones y otras construcciones verticales, como edificios institucionales, hospitales, escuelas, estadios, edificios altos de uso mixto y de vivienda, etc. Esto se debe principalmente al hecho de que la construcción vertical es un proceso relativamente menos complejo y de permanente evolución en la satisfacción de necesidades sociales básicas, de características técnicas y organizacionales completamente diferentes al de la construcción

horizontal, como carreteras, autopistas, viaductos, puentes, túneles, etc. Cada tipo de infraestructura tiene diferentes operaciones, componentes y técnicas desde la planificación, pasando por el diseño, la construcción, hasta la operación y el mantenimiento (Costin, 2016).

En efecto, la instalaciones viales *-en este caso particular autopistas y carreteras-* dependen en gran medida de las condiciones propias del terreno por ejemplo y de operaciones de movimiento de tierra, mientras que las edificaciones son menos propensas a estos elementos. Los factores culturales, ambientales, de gestión y contractuales también hacen diferencia entre los dos tipos de construcción (Agdas y Ellis, 2019). Además, los proyectos lineales/horizontales como la infraestructura vial son típicamente proyectos públicos que son propiedad del Estado y están operados directamente o por terceros (*concesiones o alianza público-privada*) pero en todo caso bajo su responsabilidad por entidades/agencias gubernamentales, que tienen diferentes formas de financiamientos (*por ejemplo, impuestos, bonos, valorización*) y restricciones legales (*por ejemplo, licitación y otras formas de contratación*), frente a las particularidades de los proyectos privados de edificaciones.

Según Costin et al., (2018):

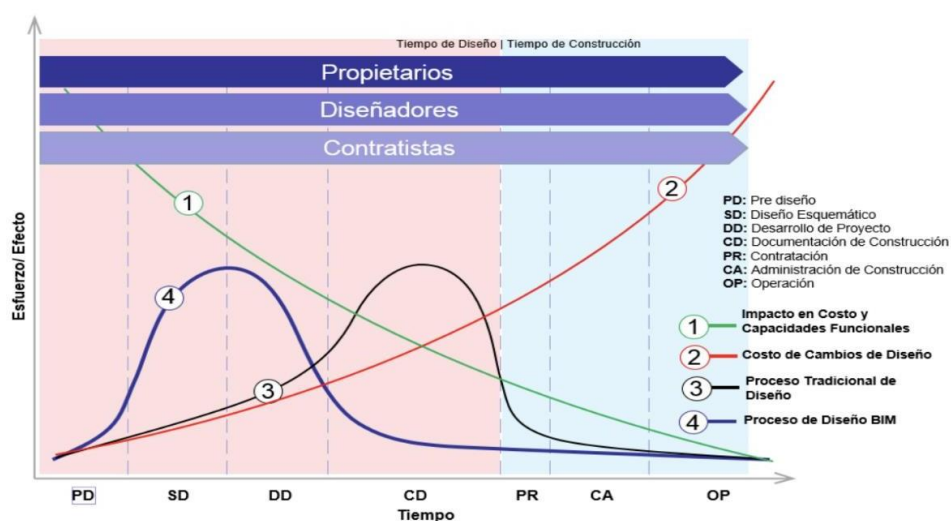
Un factor de diferencia importante entre un edificio (vertical) y una infraestructura de transporte (horizontal) es el sistema de coordenadas que se utiliza en la planificación, diseño, y construcción de esa estructura. La construcción vertical utiliza el sistema de coordenadas cartesianas como referencia única, mientras que la construcción horizontal utiliza múltiples estaciones y curvas de alineación para las referencias. Esta diferencia ha sido una barrera importante para la adopción directa y la aplicación de las tecnologías BIM tradicionales en el sector de infraestructura de transporte, ya que las herramientas clásicas de diseño utilizan principalmente el sistema de coordenadas cartesianas. (p.259)

Ahora bien, los Modelos Integrales de Información continúan avanzando y ampliando su campo de aplicación, con amplias ventajas sobre el método tradicional de administración de la información de los proyectos de infraestructura, y en tal sentido la metodología BIM surge como nuevo estándar para la gestión gerencial de activos. Con esta óptica, la Figura 4, conocida como la curva MacLeamy (Cook y Garrett, 2014), muestra las utilidades de aprovechar los Modelos Integrales de Información, como Building Information Modeling -BIM-, desde la etapa de planeación y diseño y durante todo el ciclo de vida. Para ilustrar el comportamiento de las funciones indicadas en esta la Figura 4, se acude a la exposición presentada en la referencia bibliográfica (Sierra, 2016).

La curva sugiere que si movemos el esfuerzo de diseño inicial en el proyecto (a la izquierda), este será más eficiente que el proceso de diseño tradicional. Esto también significa *-de modo particular-* que un proyecto bajo el modelo BIM necesitará un plan de personal y recursos tecnológicos diferente que un proyecto de diseño tradicional; no obstante, el presupuesto global de recursos no cambia necesariamente, puesto que en esencia se requiere asignar oportunamente el personal de diseño y sus recursos técnicos en esta etapa del proyecto. Tal anotación es fundamental para los gerentes de proyectos que consideran a la metodología de modelos integrales de información asociada a un riesgo financiero, porque la percepción es que va a costar más y requiere de mayor esfuerzo.

Figura 4

Procesos de diseño tradicional vs. Procesos de diseño con Modelos Integrales como BIM



Nota. La figura muestra las utilidades de aprovechar los Modelos Integrales de Información.

Tomada de *Curva MacLeamy*, por M. Cook y D. Garrett, 2014, New Society Publishers

La curva en negro de la Figura 4 representa el esfuerzo del diseño tradicional desde el inicio del ciclo de vida hasta la etapa operación/explotación. El esfuerzo de las actividades de la etapa de planeación y diseño se alcanza finalmente con la documentación de construcción (CD). La curva azul, observada también en la Figura 4, representa el proceso de modelos integrales -en este caso BIM- que se mueve más pronto durante el cronograma del proyecto (vea SD/DD), con un mayor esfuerzo y efecto respecto a la primera. La curva descendente verde de la Figura 4 indica la tendencia para impactar el costo y las capacidades funcionales de un diseño, es decir, los primeros cambios relacionados con el prediseño tendrán un mayor efecto sobre el producto y se pueden implementar a bajo precio, al reducir los costos de manera eficiente, y ese impacto disminuye a lo largo de las etapas del horizonte de tiempo. Asimismo, la línea ascendente de color rojo, que se muestra en la Figura 4, pone de manifiesto que, a medida que avanza el proyecto, el costo de hacer cambios aumenta sustancialmente.

Hoy en día la metodología BIM ha abierto campos de aplicación en todos los procesos de las etapas del ciclo de vida de los proyectos de infraestructura (Bohórquez et al., 2018; Giovanni et al., 2017). A nivel general, las instituciones y empresas avanzadas tecnológicamente continúan preparando a sus profesionales para con esta nueva plataforma gerenciar los proyectos durante toda la vida económica. La formación y desarrollo de BIM data desde hace más de 35 años, en 1981 irrumpe como novedad en la gestión tecnológica para proyectos de edificaciones o infraestructura vertical, hasta evolucionar a su estado presente que incorpora toda la información de las instalaciones, en las diferentes dimensiones: 2D, 3D, 4D, 5D, 6D y 7D descritos en la **Figura 5**. En la actualidad se continúa en el desarrollo de los modelos a nivel 4D (tiempo), 5D (costo), 6D (sostenibilidad) y 7D (gestión), las dimensiones 2D y 3D han sido apropiadas de manera eficiente y con excelentes resultados por todos los recursos tecnológicos del modelo BIM. Ahora bien, en estas circunstancias de incorporación de nuevas dimensiones, Building Information Modeling se ha convertido en una de las tecnologías más innovadoras y prometedoras para la gestión gerencial de proyectos o de activos del sector de infraestructura (Bohórquez-Castellanos et al., 2018).

Figura 5

Dimensiones BIM



Nota. La figura describe las dimensiones de BIM. Tomada de *Las Dimensiones de BIM*, por Francisco Carmona, 2018, Expanda Management.

BIM ha venido evolucionando, pasando de ser una tecnología para el modelado 3D a una metodología altamente transformadora en el manejo de la información que permite gestionar de manera óptima los proyectos/activos de infraestructura. Igualmente, los modelos para la toma de decisiones paulatinamente han venido cambiando su enfoque netamente basado en la relación costo-beneficio a una perspectiva más dinámica y multidisciplinaria que se adapta a los nuevos retos que la industria demanda. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de novedosos instrumentos que facilitan el proceso de toma de decisiones en problemas de mayor complejidad, como el Análisis del Costo del Ciclo de Vida -*Life Cycle Cost* LCC- definido como un proceso sistemático y analítico de evaluación de inversiones, que integra todas las etapas del horizonte económico de los proyectos. Por lo tanto, entendiendo BIM en la totalidad de las siete dimensiones que abarca y con la incorporación de los nuevos enfoques de análisis de negocios, se puede inferir que estas innovaciones tecnológicas tienen un importante impacto sobre la moderna concepción de la gestión de activos de infraestructura, que contribuirá a cerrar la brecha entre las necesidades apremiantes de inversión de capital y las limitaciones propias de fuentes de financiación.

De la literatura previamente consultada, con el propósito de establecer una aproximación actualizada sobre la producción bibliográfica relacionada con el tema de investigación, y propiamente en ‘modelos integrales de información aplicados en la etapa de operación/explotación de activos de infraestructura vial’, se revisó especialmente el artículo “Building Information Modeling (BIM) para infraestructura de transporte: revisión de literatura, aplicaciones, desafíos y recomendaciones” (Costin et al., 2018).

Costin et al. (2018) reconoce en primer término, la importancia del sector transporte y los requerimientos tecnológicos para su modernización. En esa dirección, se puede afirmar que la infraestructura vial -*como elemento fundamental del sector transporte*- es un factor

definitivo para la economía, la seguridad y el bienestar en general de una sociedad. En la actualidad, el crecimiento demográfico de los países y el amplio tamaño de sus mercados plantean retos y necesidades importantes en innovaciones y desarrollos tecnológicos que faciliten las decisiones técnicas, sociales, económicas y ambientales para operar y mantener, reponer, optimizar y ampliar la infraestructura vial, y así atender de forma eficiente y rentable las exigencias de una demanda cada vez más creciente.

Los modelos integrales de información se han utilizado frecuentemente en la industria de la construcción de edificaciones, con resultados muy positivos para el avance de este sector; así mismo, sus principios y metodologías permiten su aplicación en otros sectores, en particular en la infraestructura vial con amplios beneficios para el desarrollo de esta industria.

En el citado artículo, se presenta “una revisión de la literatura y un análisis crítico de BIM para la infraestructura de transporte. Se revisaron un total de 189 publicaciones en el área de BIM para infraestructura de transporte, incluidos artículos de revistas, actas de congresos e informes publicados”, con el objetivo de “facilitar aún más la investigación relacionada con BIM para la infraestructura de transporte y las aplicaciones en este dominio”. Como resultado de la clasificación de las publicaciones en función de las áreas de estudio, solo cinco (5) tratan sobre ‘*infraestructura vial y gestión de activos*’. (Aziz, 2017)

Tabla 1

Publicaciones sobre Infraestructura y Gestión de Activos

| Artículo | Autor | Fecha | Editorial | Overview |
|--|--|-------|----------------|--|
| BIM for sustainable wholeof-life transport infrastructure asset management | A. Sanchez, J.A. Kraatz, K.D. Hampson, S. Loganathan | 2014 | ICE Publishing | BIM en la etapa de diseño de la infraestructura de transporte podría proporcionar mayores beneficios al integrar el diseño con los objetivos de sostenibilidad de la gestión de activos. |

| | | | | |
|---|-------------------------------|------------------|--|--|
| Large-scale transportation infrastructure projects using building information modelling | R. Shetwi, B. Farooq, C. Popa | Mayo 24-26, 2015 | Transportation Research Board - TBR | El modelo propuesto es un modelo 5D que incluye visualización 3D, programación, estimación de costos de instalaciones, y demuestra la eficiencia de BIM frente a los enfoques tradicionales. |
| Maintaining subway infrastructure using BIM | M. Marzouk, A. Abdelaty | Mayo 21-23, 2012 | ASCE - American Society of Civil Engineers | Aplicación de BIM en proyecto metro, como sistema de ayuda a los administradores de instalaciones en las decisiones de rehabilitación, teniendo en cuenta los objetivos y asignación presupuestaria. |
| Monitoring thermal comfort in subways using building Information modeling | M. Marzouk, A. Abdelaty | 2014 | Elsevier | Presenta una aplicación que utiliza la red de sensores inalámbricos (WSN) y el modelado de información de edificios (BIM) para monitorear las condiciones térmicas dentro de un metro y optimizar costos operacionales. |
| The information requirements for transportation industry's facilities management based on BIM | Qing Liu, Tao Gao | 2017 | Bentham Open | Objetivo central de apoyar a la autoridad de transporte público en la adopción y utilización de procesos BIM mediante la evaluación de su estado actual de ejecución de la metodología, y la definición de requisitos de información para la gestión de las instalaciones. |

Nota. Esta tabla muestra los datos generales de las publicaciones.

Entonces de manera preferente, pero no excluyente, los cinco (5) documentos proporcionan la línea base para la presente investigación, que permitirá abordar un mayor conocimiento científico acerca de los modelos integrales de información y su gran potencial de aplicación para todas las partes o actores *-a nivel de las instituciones, la academia y la industria-* interesados en la gestión de activos de infraestructura vial (Skandhakumar et al., 2016).

En efecto, el documento referido concluye que el uso de BIM en el sector de infraestructura de transporte ha venido creciendo, aunque la investigación se ha centrado

principalmente en la etapa de planeación y diseño de proyectos. No obstante, ante la discreta cantidad de publicaciones referidas a la etapa de operación/explotación de las instalaciones viales, los autores sugieren que de frente a las necesidades apremiantes de la demanda se requiere de nuevos desarrollos e innovaciones en la gestión gerencial y tecnológica de los activos de esta industria.

En esa dirección, la presente investigación parte de la hipótesis que con el uso de modelos integrales de información para la gestión de la infraestructura vial se logrará gerenciar de forma más confiable, sostenible y segura la etapa de operación/explotación de estos activos, con la consecuente disminución de costos y riesgos, y generación de mayor valor y retornos económicos y sociales para todos los interesados.

Del mismo modo, el artículo plantea un aspecto de suma importancia en el sentido que “se requiere la colaboración continua entre la academia y la industria para mitigar la mayoría de los desafíos y aprovechar todo el potencial de BIM para la infraestructura de transporte”. Así mismo, recomienda la formulación de un modelo de capacitación y educación que sea simple, pero eficiente, para que las partes interesadas lo adopten. Por lo tanto, diseñar y estructurar un programa de capacitación e implementación de la tecnología BIM para profesionales e industriales sería otro esfuerzo de investigación en el futuro (Costin, 2016).

Los Modelos Integrales transitan hacia la productividad, en la medida que su implementación no es solo un cambio tecnológico sino también comprende transformaciones organizacionales con relación a los roles y actuaciones, flujos de procesos, canales de comunicación y, en general, modificaciones notables en la cultura empresarial. El desarrollo y la aplicación de esta nueva metodología requiere de un proceso de “Gestión del Cambio” que aconseja el conocimiento y adopción de las mejores prácticas derivadas del avance científico y los casos de éxito en los diferentes sectores económicos.

En tal sentido, en primer término, se debe obtener el apoyo y compromiso efectivo de la alta dirección de la organización, con plena consciencia de los objetivos, alcances, riesgos y beneficios de la aplicación de BIM. Así mismo, es fundamental la conformación de un comité de implementación integrado por los directivos de las diferentes áreas empresariales -*gerencia, planeación, ingeniería, financiera, administrativa, de tecnología y recursos humanos*-, en razón a que la transformación abarca de manera transversal a toda la organización. El comité es un componente esencial durante el periodo de implementación por su alto nivel de dirección y responsabilidad en todo el proceso de Gestión del Cambio; a su turno, deberá designar un líder de la fase de transformación y formular un plan de acción que incluya los siguientes cuatro elementos considerados básicos en el establecimiento de BIM, en la etapa de operación/explotación: tecnología, procesos, talento humano y gestión gerencial de activos.

Durante la implementación es necesario transformar la cultura de la organización y ese es un verdadero desafío pues de su éxito depende que BIM se adopte y sea apropiado y sostenible en el tiempo, para lograrlo se requiere un plan detallado de Gestión del Cambio que impacte toda la empresa, con un mensaje claro de sentido de prioridad desde el nivel gerencial, a efectos de construir una alianza sólida del talento humano, determinar y comunicar la visión, diseñar los programas de capacitación de manera estructurada, resolver las barreras y limitaciones, generar iniciativas de rápido resultado o victorias tempranas, e institucionalizar la transformación. Además, con un plan de Gestión del Cambio exitoso se logrará asegurar su sostenibilidad en el tiempo y un proceso de mejora continua después del establecimiento de BIM.

En definitiva, la investigación abre un espacio para los Modelos Integrales de Información desde una perspectiva global e incluyente que reúne a la tecnología junto a los procesos socio-culturales inherentes al cambio dentro de una organización, como estrategia

ganadora para obtener los mayores beneficios del proceso de implementación de BIM, en todas las etapas del ciclo de vida de los proyectos/activos de infraestructura, y especialmente en la gestión gerencial de activos viales, a manera de aprovechamiento de esta transformación disruptiva e innovadora.

1.3. Ingeniería de Valor

La Ingeniería de Valor -Value Engineering- es una metodología para resolver problemas, identificar y eliminar costos inútiles de un producto o servicio, al mismo tiempo que mejora los requerimientos funcionales y de calidad. Se trata de aumentar el valor de los productos o servicios para suministrarlos a los precios más bajos posibles (Mohamed, 2020).

En ese sentido, el objetivo principal de la Ingeniería de Valor es el incremento de la relación entre el rendimiento, la calidad y la funcionalidad del producto, servicio o proyecto, y sus costos de inversión y de operación y mantenimiento. En efecto, para la Ingeniería de Valor, el valor del producto o proyecto es simplemente la relación entre las funciones que realiza y su costo.

Con la integración del concepto de Ingeniería de Valor a los nuevos modelos de gestión de proyectos/activos, en particular bajo el entorno BIM, se pretende identificar y eliminar costos inútiles y al mismo tiempo mejorar los rendimientos funcionales y de calidad, con el propósito central de ganar valor mediante la optimización de costos, durante las etapas del ciclo de vida del proyecto (M. Bedian, 2002; R. Rachwan et al., 2016).

Desde el punto de vista organizacional, para introducir estos nuevos conceptos, es necesario comenzar con la formación de un equipo interdisciplinario de trabajo en sus diferentes niveles y competencias, que posibilite acometer tareas con enfoque colaborativo y de mayor alcance, como lo exige la Gestión de Activos integrada con BIM y la Ingeniería de

Valor. En especial, el éxito en la implementación de estas innovaciones tecnológicas radica en gran parte en la preparación de los recursos humanos especializados para la apropiación de los nuevos modelos integrales de información de gestión de proyectos.

La Ingeniería de Valor aplicada a los proyectos de infraestructura vial consta de cuatro fases (Mohamed, 2020):

- **Información:** En esta fase se define el problema a solucionar, se evalúa la viabilidad de la aplicación de la Ingeniería de Valor en los proyectos, se recopilan datos sobre el estado actual de la infraestructura vial, sus limitaciones y requisitos y se asignan recursos.
- **Especulativa:** A continuación, se formulan alternativas de solución para la infraestructura vial que impliquen costos más bajos.
- **Analítica:** Para tal efecto, se hacen comparaciones de costos y se evalúan las alternativas para definir la solución óptima. En este análisis, se entiende el producto o servicio desde una perspectiva funcional, es decir la prestación del servicio de la infraestructura vial.
- **Investigación:** En esta fase final se presenta la investigación derivada del estudio de Ingeniería de Valor, que permitirá optimizar los beneficios de los activos de infraestructura vial en la etapa de operación/explotación, y desde luego atendiendo a los requerimientos funcionales del cliente/usuario.

La Ingeniería de Valor incorpora dos novedosos enfoques de gestión de proyectos/activos buscando beneficios concurrentes y constantes en todo el ciclo económico, con *Lean Construction* -LC- se aporta la perspectiva de mejora continua en los procesos bajo los requerimientos del producto/servicio relacionados con el cliente/usuario; así mismo, la metodología *Integrated Project Delivery* -IPD- apunta a desarrollar un trabajo en conjunto y

colaborativo de todos los actores e interesados para facilitar sinergias que disminuyan los riesgos y posibiliten mayor grado de eficiencia.

1.3.1. Lean Construction Project -LCP-

Según el Lean Construction Institute -LCI-, esta filosofía se orienta hacia la administración de los procesos de un sistema y su objetivo principal es reducir o eliminar las actividades que no agregan valor al proyecto/activo y optimizar las actividades que sí lo hacen; en tal sentido, se enfoca principalmente a crear valor en las etapas de desarrollo del proyecto (Babalola et al., 2019; Jamil y Fathi, 2016). De manera general, *Lean Construction* -LC- introduce principios que cambian el marco conceptual de la gestión de proyectos/activos, para dar prioridad al mejoramiento de la productividad a través de la reducción de pérdidas en los recursos empleados y ofrecer mayor estabilidad en el flujo de trabajo (Porrás et al., 2014).

Algunos de los beneficios que proporciona se describen a continuación:

- Reducción de costos de ejecución
- Disminución de la tasa de accidentes laborales
- Predictibilidad en los tiempos de ejecución del proyecto
- Proyectos entregados antes de tiempo pautado
- Menos defectos y menos re-trabajo
- Mejora continuada
- Incremento de las ganancias para todas las partes involucradas
- Integración con la cadena de suministro

En especial, el enfoque *Lean Construction* -LC- propende por ahorrar recursos de todo orden y disminuir pérdidas de materiales, talento humano, trabajo y tiempo, a lo largo del ciclo de vida del activo de manera que se minimice el costo para el cliente (inversionista/propietario,

operador o usuario), y así cumplir con los objetivos sociales del servicio de la infraestructura vial y generar la cantidad máxima posible de valor económico. En este marco, en particular, *Lean Construction* -LC- busca la excelencia por medio de un proceso de mejora continua en las organizaciones encargadas de la gestión de activos viales, que reduzca o elimine todas aquellas actividades y servicios que no añaden valor, por medio de la optimización de los recursos y la entrega de mayor valor al cliente, para operar/explotar la infraestructura a un mínimo costo, máxima calidad, mayor seguridad y con menores tiempos de respuesta del servicio, dentro de un ecosistema determinado. (Lezan y Achell, 2014)

1.3.2. Integrated Project Delivery -IPD-

En 1990, el equipo interno de British Petroleum -BP- formó un grupo integrado que combinó los intereses de las áreas de ingeniería, subsuelo y comercial, que llamaron '*Alliancing*' y tuvieron un éxito espectacular. En los años siguientes, se continuó mejorando el concepto y emergió con una nueva cara llamada IPD. Basado en el Instituto Americano de Arquitectos, la definición más reciente de IPD establece que es "un método de entrega de proyectos que integra personas, sistemas, estructuras comerciales y prácticas en un proceso que en conjunto aprovecha los talentos y conocimientos de todos los participantes" (Fakhimi et al., 2016); en particular, con este nuevo modelo se propone agregar valor al proyecto optimizando los niveles de eficiencia para lograr un costo objetivo previamente acordado por todas las partes interesadas.

Algunos de los beneficios que proporciona se describen a continuación:

- Reducir o eliminar conflictos en el equipo del proyecto.
- Optimizar los esfuerzos de la fuerza laboral.
- Mejorar la comunicación y el entendimiento entre partes interesadas del proyecto.
- Resultado de una definición más clara de los objetivos del proyecto.

- Crear incentivos para resultados excepcionales.
- Reducir los residuos mediante una mejor planificación y costes compartidos.
- Mejorar los plazos de entrega del proyecto.
- Reducir los costos operativos y de mantenimiento del proyecto terminado
- Alentar al equipo a tomar un enfoque creativo para atender las necesidades del cliente.

En ese marco, *Integrated Project Delivery -IPD-* es un enfoque de entrega de proyectos y de Gestión de Activos que comprende e integra todos los recursos de la organización en un macro-proceso que aprovecha de forma relacional y colaborativa los talentos, las ideas e innovaciones de los actores/participantes, para optimizar los resultados económicos y lograr maximizar el valor para el inversionista/propietario y/u operador, reduciendo el desperdicio y aumentando la eficiencia a través de todas las etapas del ciclo de vida de la infraestructura vial. Con *Integrated Project Delivery -IPD-* se asegura la alineación de las partes interesadas/participantes con las metas colaborativas o de equipo en el proceso de la gestión de proyectos y/o activos (Lezana y Achell, 2014).

1.4. Gestión de Activos

El Instituto de Gestión de Activos (IAM, Institute of Asset Management, www.theIAM.org) elaboró y publicó el libro titulado “Asset Management – An anatomy”, versión 3 (2015), “para proporcionar una apreciación de la gestión de activos, tanto para expertos como para recién llegados: qué es, qué puede lograr, el alcance de la disciplina y una descripción de los conceptos y la filosofía subyacentes”.

En efecto, la importante obra contempla seis ‘grupos de temas’ que permiten definir y comprender el alcance que es la gestión de activos, a saber:

1. Estrategia de gestión y planificación de activos.

2. Planificación de la gestión de activos.
3. Actividades del ciclo de vida del activo.
4. Conocimiento de los activos.
5. Organización y personas.
6. Revisión y riesgos.

Figura 6

Grupos de Temas de la Gestión de Activos. IAM, Institute of Asset Management



Nota. La figura muestra los temas de la Gestión de Archivos. Tomada de *Gestión de activos: una anatomía*, por Institute of Asset Management, 2015.

El IAM define treinta y nueve temas divididos en los 6 grupos mencionados, y se puede observar que la gestión de información para la gerencia de activos es totalmente transversal a todos los grupos; por lo tanto, la propuesta de aplicar modelos integrales de información puede

suponerse como una estrategia empresarial para lograr alinear los objetivos organizacionales y la generación de valor de los activos, y facilitar la toma de decisiones a partir del conocimiento basado en información, durante el ciclo de vida de los activos. Esta innovación tecnológica, implica una transformación cultural a nivel de procesos y de talento humano que es preciso advertir desde el momento mismo de la decisión empresarial de implementación del nuevo enfoque de gestión de activos. Además, explícitamente se requiere analizar los riesgos asociados con el no cumplimiento de las expectativas y requerimientos del usuario final, y por ende se hace imperativo aplicar técnicas de mejoramiento continuo para privilegiar los intereses del cliente.

La Gestión de Activos conforme al conjunto de normas ISO 55000 se concibe como un sistema estructurado en la implementación de "procesos y actividades de planificación y toma de decisiones basados en riesgo y orientados a la información que transforman los objetivos de la organización en planes de gestión de activos". En el caso singular de la infraestructura vial, por el mismo modelo de negocio en que los activos representan igualmente el servicio/producto por su uso directo, los objetivos de los actores/partes interesadas -*stackholders*- están estrechamente alineados con los propósitos de gestión de activos, que finalmente se traducen en proporcionar un servicio óptimo a los usuarios de la infraestructura. Ante la necesidad de establecer "procesos de planificación y toma de decisiones basados en el riesgo", la Gestión de Activos requiere de métodos y técnicas innovadoras que faciliten disponer de información de alta calidad para el ejercicio propio de la gerencia.

La Gestión de Activos también comprende un enfoque distinto y una nueva forma de pensar que implica un cambio en la cultura organizacional y en la gerencia de las instalaciones durante su ciclo de vida. Por lo tanto, cada institución o entidad propietaria del proyecto/activo es independiente para establecer y estimar la generación de valor de sus activos, y por supuesto

será autónoma en determinar su organización, recursos y costos correspondientes a su gestión. En estos términos, una gerencia efectiva tendrá la habilidad para reducir el costo de la Gestión de Activos en el horizonte de vida útil, atendiendo a la normatividad de la familia ISO 55000 que requiere de la definición de una política y la formulación de un plan estratégico, con un proceso de planificación integral para optimizar su portafolio de activos/inversiones en todas las etapas del ciclo de vida, además de disponer de un conjunto de procesos operativos documentados para el desarrollo y ejecución de la gestión, y particularmente bajo un enfoque de mejoramiento continuo.

Sobre el punto anterior, el autor Luis Amendola en su libro ‘Gestión Integral de Activos’, expresa “en el mundo empresarial se considera la Gestión de Activos como la planificación y la programación sistemática de los recursos físicos (equipos, maquinarias, instalaciones) de una empresa a lo largo de su vida útil. Precisamente, a este periodo de tiempo se le conoce como Ciclo de Vida del Activo Físico y debe incluir las especificaciones, características y condiciones de diseño y construcción del activo físico, su operación, su modificación durante el uso, y su retirada en el momento oportuno” (2015).

No obstante, para estimar el costo de la Gestión de Activos en la etapa de operación/explotación se puede acudir al método de análisis de costo-beneficio, como disciplina formal utilizada en la evaluación de proyectos o, en este caso, para analizar un planteamiento puntual con destino a tomar de decisiones o simplemente con el fin de encontrar mayores elementos de información que faculten una acción propia, por motivación o iniciativa de un actor/agente o parte interesada. De manera esencial, su uso en la presente ocasión está asociado a la determinación del costo de oportunidad que representa la Gestión de Activos, en función de los beneficios estimados por concepto de la productividad sobre el total de los costos de operación/explotación.

En consecuencia, según Platfoot (2020), del valor comercial obtenido de una organización al implementar su Gestión de Activos de conformidad con la referida norma ISO mediante el análisis de costo-beneficio, se concluye que la ganancia en productividad *-solo por este concepto, puesto que se generan otros beneficios-* conduce a un ahorro esperado del 10% de los costos totales de operación; por consiguiente, se puede considerar que la organización estaría dispuesta a asumir este parámetro como el estimativo más apropiado del costo de la Gestión Activos, y en tal circunstancia los beneficios particulares derivados por la mayor eficiencia en los procesos operacionales, la optimización del capital de trabajo, reducción de los gastos de mantenimiento y de las inversiones de capital en rehabilitación y reposición de instalaciones *-entre otros-*, representan la generación de valor de los activos por la gestión gerencial aplicada.

Los objetivos estratégicos de la Gestión de Activos, en términos de las actividades o intervenciones a nivel gerencial sobre la operación y mantenimiento de los bienes/servicios, se formulan en la planificación del sistema en función del tipo de activo y los procesos de toma de decisiones. En la actualidad, para cumplir esos objetivos, las organizaciones soportan sus decisiones en metodologías básicas de ponderación de los estados y condiciones físicas de sus instalaciones; no obstante, algunas mejoran sus prácticas a nivel más competente incluyendo Indicadores Clave de Desempeño -KPI- e igualmente métodos de análisis de riesgo.

La introducción de elementos de decisión como KPIs y evaluación de riesgo en la Gestión de Activos, es un avance reciente que supera la metodología primaria de calificación del estado y constituye una metodología más completa y objetiva para las decisiones gerenciales sobre la infraestructura. Sin embargo, los desafíos son mayores pues se requiere una visión más coordinada entre todas las partes interesadas de frente a las expectativas del

servicio para el usuario final, además de considerar un horizonte integral de todas las etapas del ciclo de vida de las instalaciones, que sugiere métodos más flexibles e innovadores.

Los Modelos Integrales de Información responden a los retos actuales a partir de fomentar la colaboración entre los diferentes actores intervinientes en la Gestión de Activos: gobierno, inversionistas, contratistas, subcontratistas, proveedores, usuarios de la infraestructura, etc. También, incluyen procesos para la obtención, conservación, administración, transferencia y gestión de los datos de los activos, así como para el uso de la información a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de las instalaciones.

Entonces, emerge Building Information Modeling - BIM como propuesta contemporánea de un modelo de información para el sector de la construcción, que incorpora la coordinación de diferentes tecnologías en el desarrollo de proyectos con el objeto de lograr mayor competitividad y crecimiento de esta industria. En su implementación y expansión reciente, BIM ha demostrado que mejora notablemente los métodos tradicionales de gestión de la información, en las etapas de diseño y ejecución/construcción de los proyectos, optimizando recursos y reduciendo costos al tiempo que permite administrar menores niveles de riesgos y aumentar la productividad en el sector.

En este sentido, habiendo evidenciado las bondades de este Modelo Integral de Información, el cambio tecnológico es inevitable, conveniente y apremiante, mediante la transformación del conocimiento aplicado para integrar diversas disciplinas y distintos actores hacia la innovación en la Gestión de Activos; esta integración tecnológica comprende en primer lugar la extensión de BIM a todas las etapas del ciclo de vida económica *-singularmente en el periodo de operación/explotación-* y, de otra parte, el escalamiento de su utilización a nivel gerencial en el proceso de toma decisiones.

De acuerdo con De Solminihac et al. (2019), y en particular para infraestructura vial, “la gestión de activos se define como un proceso destinado a preservar los activos viales de una red, maximizando los beneficios de los usuarios y de los inversionistas (privado o público), y minimizando al mismo tiempo los costos de mantenimiento de las agencias viales, bajo un objetivo de calidad común a todos los actores. Por tanto, la gestión de activos es un lenguaje y un medio de comunicación entre los actores tales como los usuarios del sistema, las agencias viales, los funcionarios del gobierno, los inversionistas y los operadores durante el ciclo de vida de los activos, cubriendo los procesos de diseño, construcción, operación/explotación, mantenimiento y reemplazo de activos”.

Ruitenburg, et. al, (2014) propone los siguientes 5 criterios para esta definición:

- Es una práctica multidisciplinaria.
- Se considera todo el ciclo de vida de los activos.
- Su propósito es lograr los objetivos de la organización previamente establecidos.
- Dentro de los límites de riesgo aceptables y de los regímenes pertinentes, y
- Asignando los recursos correspondientes para desarrollar la gestión.

De otro lado, Campbell (2016) integra estas visiones y afirma que la Gestión de Activos es la interacción de las diferentes áreas habilitadoras de una organización (operaciones, mantenimiento, finanzas, talento humano, logística, compras, etc.) a través de procesos, prácticas y actividades, que de forma coordinada les permite gestionar los riesgos para lograr generar valor a la organización.

Adicionalmente, se define el Sistema de Gestión de Activos -SGA-, como un componente de la estructura empresarial que planifica y controla las actividades relacionadas para asegurar que el rendimiento de los activos se adapte a la estrategia competitiva prevista

por la organización, esta definición proporciona una visión holística e integrada del SGA dentro de toda la institución (Ferguson et al., 2011).

La Gestión de Activos traduce los objetivos de negocio en decisiones, planes y acciones relacionadas con activos dentro de un marco estratégico utilizando un conjunto de procesos, técnicas y herramientas. Busca optimizar el costo, el riesgo y el rendimiento de los activos a lo largo de su ciclo de vida a nivel de bienes individuales, sistemas de activos y cartera/portafolio de activos.

Las prácticas mejoradas de Gestión de Activos son esencialmente útiles en organizaciones y negocios intensivos en inversiones de capital en activos fijos, donde hay desafíos importantes que abordar en términos de aumento de la demanda de servicios, expectativas crecientes de las partes interesadas, deterioro de la base de activos y financiación limitada.

Las normas de la familia ISO 55000 establecen los requisitos para el establecimiento, implementación, mantenimiento y mejora de un Sistema de Gestión de Activos; dirigido a las personas interesadas y vinculadas dentro del proceso, tanto internas como externas de la organización (ejemplo: proveedores/subcontratistas), que son consideradas como actores principales para el éxito del sistema y su sostenibilidad.

Los principales componentes de un Sistema de Gestión de Activos se presentan en la *Figura 7* y comprenden: las políticas (roles, responsabilidades y autoridades); los sistemas de implementación (programas informáticos, aplicaciones, esquemas de mantenimiento); los sistemas de evaluación y planificación (necesidades sociales, financiamiento de inversiones); los sistemas de monitoreo (seguimiento de las condiciones de los activos) y, por último, los objetivos y metas de las agencias del sector de infraestructura (kilómetros de red atendida, estándar general de la red, otros indicadores de gestión).

Figura 7*Componentes de un Sistema de Gestión de Activos*

Nota. Tomada de *Componentes de un sistema de gestión de pavimentos urbanos* (p. 532), por H. De Solminihac, T. Echaveguren y A. Chamorro, 2019, Ediciones UC.

Los elementos descritos anteriormente apoyan la Gestión de Activos sobre un marco de institucionalidad, en el sentido que las agencias viales deben tener claramente definida la política pública del sector de transporte como parte de los planes de gobierno, y sus propios objetivos y metas (Solminihac et al., 2019). Los sistemas de implementación, evaluación, planificación y monitoreo de la Gestión de Activos permiten optimizar el presupuesto de mantenimiento de las instalaciones, tanto a largo como a corto plazo.

En la Tabla 2 se pueden observar los procesos de un sistema de activos, junto con sus respectivos elementos, herramientas y actividades asociadas. La Gestión de Activos comprende procesos técnicos y administrativos propios de la infraestructura vial, como, por ejemplo, la definición de objetivos y políticas, el inventario del sistema, la evaluación de estado o condición, la evaluación de alternativas de mantenimiento, la selección de proyectos, y la implementación y monitoreo de indicadores de operación.

Tabla 2

Elementos, métodos y actividades asociadas a los componentes de un Sistema de Gestión de Activos

| Proceso | Elemento, herramienta o actividad |
|---|--|
| Objetivos | Movilidad, conservación de activos, seguridad, comodidad, cuidado del ambiente, accesibilidad |
| Políticas | Acceso, beneficios para la comunidad, desarrollo económico, estándares de ingeniería, ambiente, planes a largo plazo, requerimiento de inversionistas |
| Inventario de activos | Métodos de recolección, datos, laboratorios, evaluación de la condición actual de los activos, inventario, tipo (pavimento, estructuras, signos), localización |
| Evaluación de la condición y modelos de rendimiento | Deficiencias de los activos (análisis a nivel de red y análisis a nivel de proyecto), condición futura, modelos de deterioro, nivel de servicio, evaluación económica y financiera, métodos de financiamiento, volumen, operación de vehículos y modelos de costos del usuario |
| Evaluación de alternativas de mantenimiento | Análisis costo-beneficio; evaluación ambiental, análisis multicriterio, evaluación de riesgos y seguridad |
| Selección de proyectos | Ranking de proyectos en el ámbito económico, medioambiental, riesgos, multicriterio, tipo de gestión a nivel de red y/o de proyecto |
| Implementación | Construcción, mantenimiento, operación |
| Monitoreo de rendimientos | Inspección, evaluación de la condición, colección de datos, revisión de objetivos, revisión de políticas, revisión económica |

Nota. Esta tabla muestra observar los procesos de un sistema de activos. Adaptada de *Gestión de infraestructura vial*, por H. De Solminihac T., T.E.N. y A.C.G., 2019, Ediciones UC.

Para concluir, el Sistema de Gestión de Activos bajo los requerimientos de la familia de normas ISO 55000 del 2014 continúa siendo la base conceptual a la cual se acogen y convergen las diferentes metodologías de gestión, pero a su vez los modelos integrales de información para potenciar el valor de los activos durante todo su ciclo de vida. Todos estos elementos están estrechamente relacionados para ofrecer la satisfacción de los clientes/usuarios y atender las expectativas de las partes interesadas, al tiempo que fortalecen la capacidad de la organización para consolidar la prestación de los servicios (Ferguson et al., 2011).

Entonces, se puede afirmar que con la implementación de la normatividad ISO 55000, se ha propiciado la transformación de los procesos y metodologías de Gestión de Activos, que junto con las nuevas tecnologías de los modelos de información -BIM- han generado importantes innovaciones y, en ese sentido, los desarrollos futuros se deben caracterizar por la integración de BIM con los sistemas de gestión gerencial de infraestructura.

1.5. Modelos Integrales de Información aplicados a la Gestión de Activos

Desde la perspectiva de la gestión gerencial, los modelos integrales de información comprenden políticas, metodologías y procesos, *-con relación a las interacciones colaborativas entre personas, tecnologías y procedimientos, que colectivamente se identifican como sistemas de información-* que de manera sistemática se alinean con la estructura empresarial para contribuir al cumplimiento de los objetivos misionales.

A nivel de gestión de la información, el conjunto de norma ISO 19650 es un estándar internacional para su aplicación a lo largo de todo el ciclo de vida de un activo empleando el modelado de información de construcción, Building Information Modeling - BIM, que pretende acreditar las etapas de planificación y diseño, construcción, operación y de cierre, a fin de generar una base de información fiable para la toma de decisiones.

Como se ha expresado anteriormente en la presente investigación, la gerencia y administración de la información se desarrolla dentro de un entorno empresarial de gestión de activos, determinado por el conjunto las normas ISO 55000. A su vez, ambos componentes tanto activos como información, hacen sentido dentro de una gestión responsable de la organización conforme a su sistema de gestión de la calidad según la normativa del grupo ISO 9001.

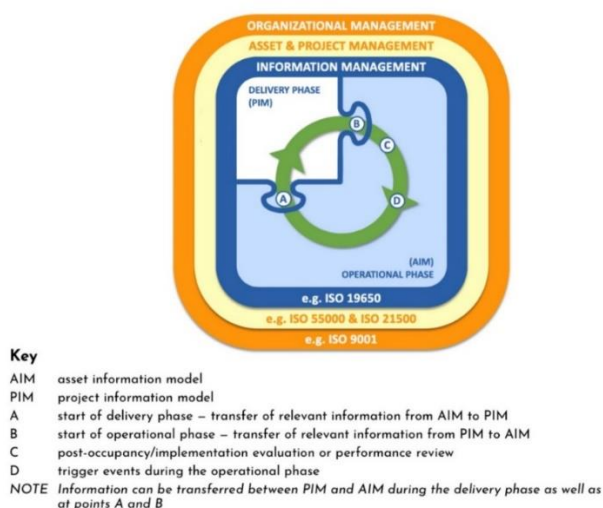
Aun así, solo por mencionar pues trasciende el alcance de esta investigación, también se pueden integrar otras normas como las familias ISO 8000 de calidad de los datos, la ISO 27000 de gestión de la seguridad de la información, y la ISO 31000 relacionada con la gestión de riesgos.

La

Figura 8, tomada de la misma norma 19650 parte 3, presenta el alcance de la gestión de la Información en las etapas del ciclo de vida económica, su relación normativa con la gestión de activos/proyectos y dentro del marco general de la organización; dando una visión genérica de los modelos integrales de información según la disposición ISO 19650 ‘Gestión de la información usando la metodología Building Information Modelling - BIM’.

Figura 8

Modelos integrales de información en el contexto de la gestión de activos y el marco organizacional



Nota. La figura muestra el Ciclo de información durante el ciclo de vida de un activo.

Tomada de *Parte 3-ISO 19650:2020*, por Casellas, 2021.

A continuación, se enuncian los siguientes principios de suma importancia para la gestión de la información de activos, en concordancia con los grupos normativos ISO 55000, y según lo establece el estándar ISO 19650:

- La participación de las personas y el fomento de comportamientos apropiados es fundamental para obtener resultados coherentes; y
- Se hace hincapié en el intercambio de las lecciones aprendidas y en la mejora continua.
- El propietario debe vincular específicamente la gestión de activos a la consecución de sus objetivos empresariales mediante políticas, estrategias y planes de gestión de activos;
- La información adecuada y oportuna sobre los activos es uno de los requisitos fundamentales para el éxito de la gestión de activos; y
- El liderazgo y el gobierno en relación con la gestión de la información de los activos provienen de la alta dirección dentro del propietario/operador del activo.

Del mismo modo, se listan los principios clave para la gestión de la información de activos, de conformidad con la normativa ISO 9001, y explícitamente contenidos en la disposición de la ISO 19650:

- Debe existir un enfoque al cliente (el destinatario o usuario de la información del activo o proyecto);
- Debe utilizarse un ciclo Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (para desarrollar y proporcionar información sobre activos o proyectos);
- La participación de las personas y el fomento de comportamientos apropiados es fundamental para obtener resultados coherentes; y

- Se hace hincapié en el intercambio de las lecciones aprendidas y en la mejora continua.

Para todos los interesados/stakeholders en la Gestión de Activos, la utilización de las tecnologías de la información ofrece importantes ventajas para adelantar las responsabilidades de esta disciplina, al disponer de sistemas de bases de datos interconectados e interoperables que pueden ser gestionados en todas las etapas del ciclo de vida económica de una infraestructura. En efecto, los Modelos Integrales de Información para la Construcción -BIM- pueden ser empleados para suministrar toda la información requerida por las partes interesadas acerca de un activo, en las distintas dimensiones de BIM (3D Geometría y espacio, 4D Tiempo y cronograma, 5D Costos, 6D Sostenibilidad y, precisamente 7D Gestión de activos), que facilitará el proceso de toma de decisiones en todo el horizonte de vida útil.

La dimensión 7D comprende el uso de los modelos con el fin de planificar, realizar y controlar las actividades y procesos relacionados con la etapa de operación/explotación del ciclo de vida de la infraestructura, logrando optimizar los resultados de la utilización de los activos. De manera particular, la 7D hace referencia a la `Gestión de Activos` de las instalaciones construidas, una vez finalizadas las obras e iniciada la etapa de operación. La correcta implementación de esta dimensión permite la aplicación del “Asset Management” (Gerencia de Activos) correspondiente a la gestión del patrimonio o de activos basada en principios como el conocimiento, la planificación, la organización y la gestión integrada (ISO 55000: 2014 Gestión de activos: descripción general, principios y terminología, 2014).

En resumen, la dimensión 7D tiene como objetivo optimizar el rendimiento de los activos y minimizar su costo, así como mejorar el servicio ofrecido; en esa dirección, BIM está produciendo una transformación tecnológica en el sector de infraestructura, con un impacto notable en el proceso de toma de decisiones a nivel gerencial. (Comité technique AIPCR D.1

y Gestion du patrimoine routier/ PIARC Technical Committee D.1 - Management of road infrastructure assets, 2019).

1.6. De la Metodología BIM a la Tecnología Digital Twins

Los proyectos de infraestructura en general se caracterizan por la alta intensidad de capital y la complejidad de su gestión en el ciclo de vida; no obstante, la transformación tecnológica ha permitido que los modelos integrales de información, Building Information Modeling - BIM, hayan modificado y evolucionado sustancialmente las actividades y procesos tradicionales en las etapa de diseño y de construcción, con un enfoque de trabajo colaborativo entre las partes/agentes interesados y resultados más eficientes. En especial, en la etapa de planeación o periodo de preinversión, los modelos BIM en el sector de infraestructura facilitan el estudio y evaluación de alternativas de diseño de los proyectos, para tomar decisiones informadas y objetivas a nivel económico, social, ambiental, institucional y de sostenibilidad integral. Estas soluciones oportunas y apropiadas de diseño conducirán a obtener importantes ventajas y beneficios en la etapa siguiente de construcción.

Ahora bien, con la transformación digital y la integración de los productos y servicios de la industria 4.0, surgen la tecnología de Gemelos Digitales -Digital Twins-, para elevar el potencial de BIM a un nivel superior, al lograr interconectar en tiempo real al mundo físico y al mundo virtual como ecosistemas en que actúan los activos de infraestructura, y así posibilitar la gestión gerencial de estas instalaciones y servicios en todas las etapas del ciclo de vida (Daniotti et al., 2022).

La evolución tecnológica a Digital Twins desde BIM permite desarrollar importantes funcionalidades de la gestión de activos, desde procesos inteligentes de captura de información, pasando por modelos de ingeniería predictiva y prescriptiva, y siempre en todo caso facilitando la toma de decisiones gerenciales en cualquier momento del horizonte de vida económica de la

infraestructura, al disponer de la información real contenida en el activo digital, con nuevas perspectivas y ventajas evidentes en términos de tiempo, costo y eficiencia empresarial.

En el desarrollo de las etapas del ciclo de vida de una infraestructura, la metodología de Building Information Modeling -BIM- da paso a la tecnología Digital Twins y a innovaciones de la industria 4.0 para proporcionar interesantes expectativas que están orientadas a favorecer los procesos de toma de decisiones, contribuyendo a la transformación digital del sector para atender los problemas y riesgos de gobernanza de la información derivados de la pérdida sistemática de su cantidad y calidad, a lo largo del horizonte de vida económica.

Con el impulso de la metodología BIM en el sector de la construcción de edificaciones, y sus amplias posibilidades en la industria de infraestructura vial, proviene la oportunidad de acoger la tecnología de gemelos digitales, aprovechando los avances de la sensorización y la concurrencia de los nuevos productos como la inteligencia artificial, internet de las cosas, inteligencia de negocios, y demás innovaciones de la industria 4.0. En tal virtud, hay que considerar a Digital Twins como una tecnología convergente que aglutina a sus pares.

La digitalización en la industria de la infraestructura, junto a la adopción de la tecnología de gemelos digitales y las innovaciones de la inteligencia artificial con sus sistemas inteligentes, sin duda permiten crear nuevos paradigmas en el sector de Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación -AECO-, al transformar las actividades de las etapas de planeación-estudios-diseños, de construcción y de operación/explotación, para inspirar una gestión gerencial de activos más eficiente y basada en soluciones informadas y objetivas, con amplios beneficios para todos los agentes o partes interesadas.

2. Metodología de Investigación

2.1. Objetivos

La investigación busca atender un importante reto de innovación tecnológica en el sector de infraestructura, para responder a la pregunta: ¿Cómo construir el diseño conceptual de un Modelo de Gestión de Activos Integral, que incorpore los avances tecnológicos de los Modelos Integrales de Información, partiendo de la visión de Building Information Modeling -BIM- en especial de la dimensión 7D 'Asset/Facility Management', con la contribución de la disciplina de Ingeniería de Valor mediante los enfoques metodológicos de Lean Construction -LC- e Integrated Project Delivery -IPD-; para a través de las actividades de la Ingeniería de Consulta facilitar y optimizar el proceso de toma de decisiones en la Gestión de Activos de Infraestructura Vial, desde la perspectiva general y particular de todos los actores/stakeholders y gestores de activos.

2.1.1. *Objetivo General*

Describir y documentar el Modelo Integral de Gestión Gerencial y Tecnológica de Activos de Infraestructura Vial, a nivel de diseño conceptual, en la etapa de operación/explotación, mediante la asistencia de la Ingeniería de Consulta en la definición del alcance para su implementación, que permita incorporar los avances tecnológicos a partir de Building Information Modeling -BIM- con las metodologías de Ingeniería de Valor: Integrated Project Delivery -IPD- y Lean Construction -LC-.

2.1.2. *Objetivos Específicos*

- Identificar factores, variables y riesgos en todas las etapas del ciclo de vida de la infraestructura vial que impactan los niveles de generación de valor de los activos.

- Estudiar y proponer la integración conceptual entre los avances tecnológicos a partir de Building Information Modeling -BIM- y las estrategias metodológicas de Ingeniería de Valor: *Integrated Project Delivery -IPD-* y *Lean Construction -LC-*.
- Especificar el alcance del diseño conceptual del modelo de gestión gerencial de activos de infraestructura vial en la etapa de operación/explotación, para incorporar los avances tecnológicos a partir de Building Information Modeling -BIM- con las nuevas metodologías de Ingeniería de Valor: *Integrated Project Delivery -IPD-* y *Lean Construction -LC-*.
- Obtener un producto, a nivel de artefacto dentro de la metodología “Design Science Research” - DSR, consistente en un ‘modelo conceptual de gestión de activos’ entendido como una representación del dominio de una solución con relación a la problemática identificada de gestión de la información en el proceso de toma de decisiones sobre las inversiones en infraestructura vial. Este modelo es de tipo conceptual utilizado para representar los elementos estructurales y sus limitaciones dentro del dominio de interés o dominio del problema; incluye las diversas entidades, sus atributos y relaciones, además de las restricciones que rigen la integridad conceptual del modelo.

2.2. Alcance

Los objetivos de la investigación están comprendidos dentro del siguiente alcance.

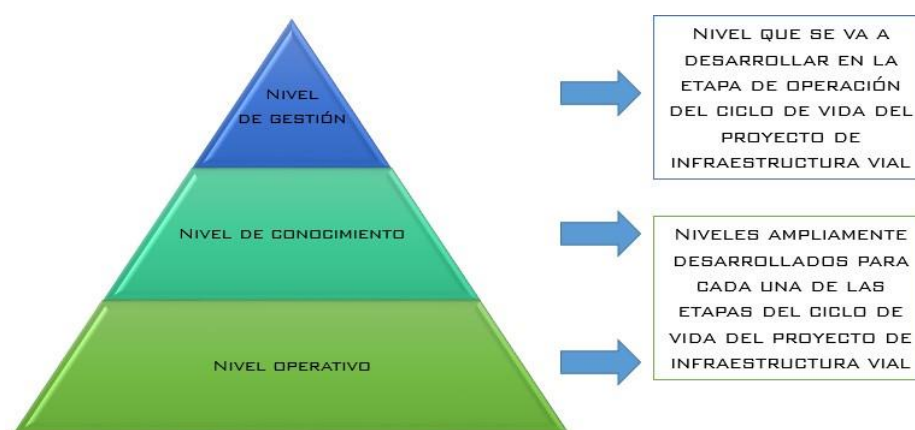
2.2.1. Tipo de Activos

La presente investigación está enfocada en construir el diseño conceptual de un modelo de gestión gerencial en la etapa de operación/explotación, para su aplicación en activos de infraestructura vial, con el fin de facilitar y optimizar los procesos de toma de decisiones de la alta dirección, con la asistencia de la Ingeniería de Consulta y teniendo en cuenta los avances tecnológicos de BIM junto a los aportes de los nuevos enfoques de Ingeniería de Valor -*IPD* y *LC-*.

Es necesario partir de un nivel apropiado de manejo de los sistemas de información, cada uno de los cuales se puede observar en la Figura 9. Dichos niveles se definen como el conjunto de procedimientos, operaciones, funciones y difusión de datos o información en una organización y se emplean para conseguir la automatización de los procesos operativos, técnicos y gerenciales y proporcionar información que sirva de apoyo en la toma de decisiones y conseguir ventajas competitivas a través de su implementación.

Figura 9

Niveles del manejo de la información para la toma de decisiones



Nota. La figura describe los niveles del manejo de la información. Tomada de *Sistemas de información en la empresa y niveles de la pirámide de información*, por José Javier Vázquez Huerta, 2015, Gestipolis.

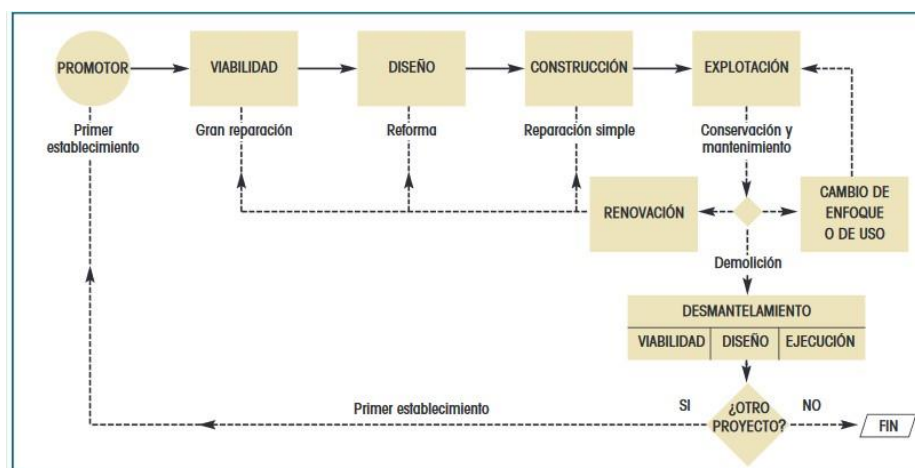
En consecuencia, para garantizar el óptimo manejo de los sistemas de información en los proyectos de infraestructura vial se hará uso de la metodología BIM, con ello se pretende fortalecer la gerencia integral y la toma de decisiones en este tipo de proyectos, dentro del alcance de la presente investigación y como propuesta de valor hacia la transformación tecnológica de los procesos aplicados por la industria de la infraestructura.

2.2.2. Operación/Explotación de Activos Viales

La infraestructura vial representa una parte significativa de los activos públicos de un país y a lo largo de su etapa de operación, por procesos naturales de deterioro, paulatinamente va perdiendo su valor (Šelih et al., 2008). Por lo tanto, este estudio se centra en plantear un modelo conceptual de gestión integral en la etapa de operación/explotación de su ciclo de vida (Figura 10), tomando en consideración la amplia duración de esta etapa y el mayor peso relativo en términos de costos, e igualmente por su significativa importancia para los inversionistas/propietarios y operadores de estos activos.

Figura 10

Ciclo de vida de un proyecto de infraestructura con enfoque de economía circular



Nota. Tomada de *Hacia una visión sistémica del ciclo de vida de la infraestructura* (p.44), por E. Pellicer, A. Al-Shubbak y J. Catalá, 2012, *Revista de Obras Públicas*, 159 (3.532).

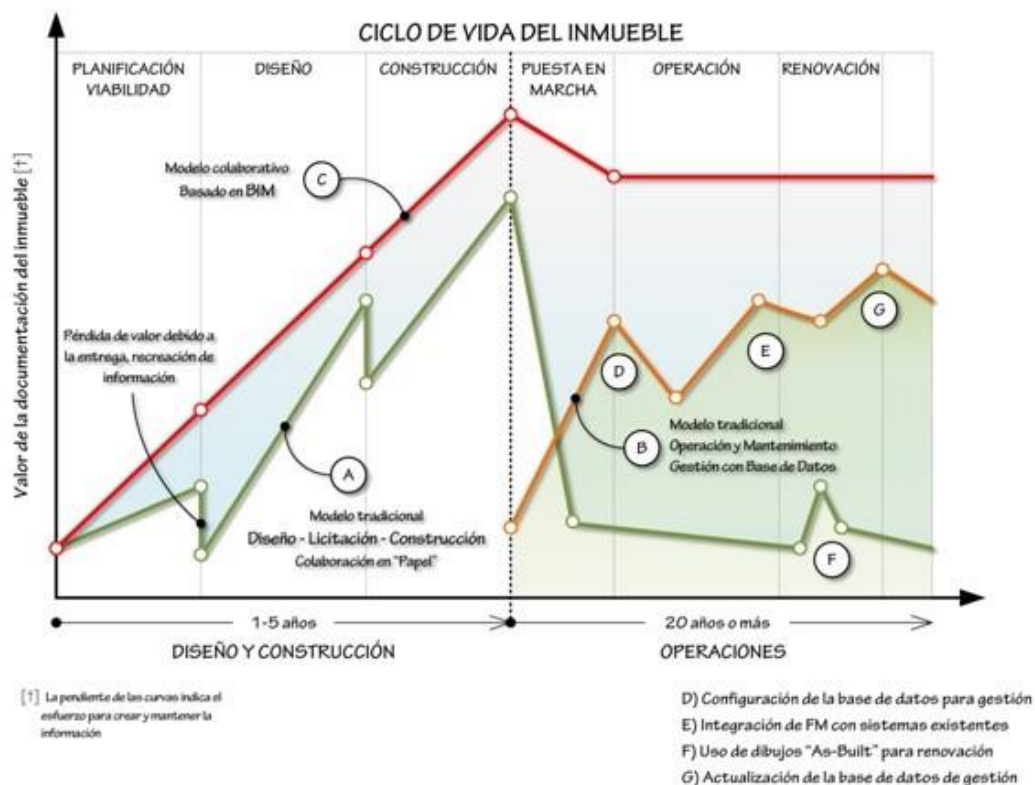
Para tal efecto, se partirá de la información generada y producida en las etapas previas de planeación y diseño y de construcción con el fin de establecer un seguimiento continuo e integral del proyecto, que permita desarrollar de manera eficiente el modelo conceptual para la toma de decisiones y la correcta gestión en la etapa de operación/explotación, con el objetivo de maximizar el valor de los activos durante todo su ciclo de vida.

Se espera que el modelo, resultado de esta investigación, pueda contribuir como “*base de conocimiento*” para continuar seguidamente la gestión en la etapa de cierre, que permita abarcar todo el horizonte del ciclo de vida del activo y siempre soportado en el concepto de economía circular con el propósito de gestionar de manera eficiente los recursos utilizados, de tal forma que se puedan conservar, mantener y renovar en el sistema económico por el mayor tiempo posible; es decir, la etapa final de cierre/demolición/deconstrucción debe estar precedida de un periodo de operación/explotación de máxima extensión o duración, con niveles de servicio apropiados para la satisfacción del usuario. En este punto, durante la fase de operación/explotación puede ampliarse la vida útil del proyecto/activo de infraestructura, al optar por su renovación para continuar prestando el servicio correspondiente antes de demoler las instalaciones, como resultado de las decisiones sobre alternativas de inversión.

Con el propósito de realizar una gestión integral de los activos se hará uso de un modelo colaborativo basado en BIM, el cual permite mediante un esfuerzo continuo recopilar y consolidar toda la información relevante de la infraestructura vial desde la etapa de planeación y diseño, pasando por la etapa de construcción, hasta la puesta en marcha y operación/explotación de las instalaciones; en esta etapa de prestación de servicios de los activos, el valor de la documentación alcanza el nivel apropiado para transitar y escalar a la gestión gerencial y toma de decisiones, tal como se evidencia en la Figura 11. De esta manera, se pueden disminuir los esfuerzos en el manejo de la información en comparación a los modelos tradicionales.

Figura 11

Representación gráfica de las pérdidas de datos durante el tiempo de vida de una infraestructura



Nota. La figura describe el ciclo de vida de un inmueble. Tomada de *Introducción a la Metodología BIM* (p. 6), por F. Choclán, M. Soler y R. González, 2014, Research Gate.

En especial, la presente investigación se centra en la dimensión 7D de BIM, con el objeto de formular un modelo integral de información para la gestión de activos de infraestructura vial en la etapa de operación/explotación, partiendo de la información escalada y consolidada a través de las etapas anteriores del ciclo de vida, con el propósito particular de tomar decisiones de inversión para optimizar la generación de valor de los activos. Al efecto, es fundamental tener en cuenta los costos que se presentan al tomar en consideración el ciclo de vida completo de las instalaciones viales, para atender de manera apropiada la demanda y bajo determinadas condiciones de nivel de servicio.

El ciclo de vida de un activo comprende las diferentes etapas del horizonte de utilidad económica de una infraestructura, desde la planeación y diseño, pasando por la construcción, para llegar a la operación/explotación del activo, y finalmente la etapa de cierre definitivo o

demolición. En este sentido, todo el horizonte de vida del activo tiene asociado un concepto denominado el “Costo del Ciclo de Vida” - CCV, (LCC por la sigla inglesa de *Life Cycle Costing*) que corresponde a la sumatoria de los costos de las distintas etapas dentro de una visión de largo plazo y un marco económico de sostenibilidad, y contiene dos componentes: CAPEX (*CAPital EXpenditure*) y OPEX (*OPeration EXpenditure*). Las inversiones de las etapas de diseño y construcción conforman el CAPEX y los costos de las etapas de operación/explotación y de cierre final o demolición/deconstrucción corresponden al OPEX.

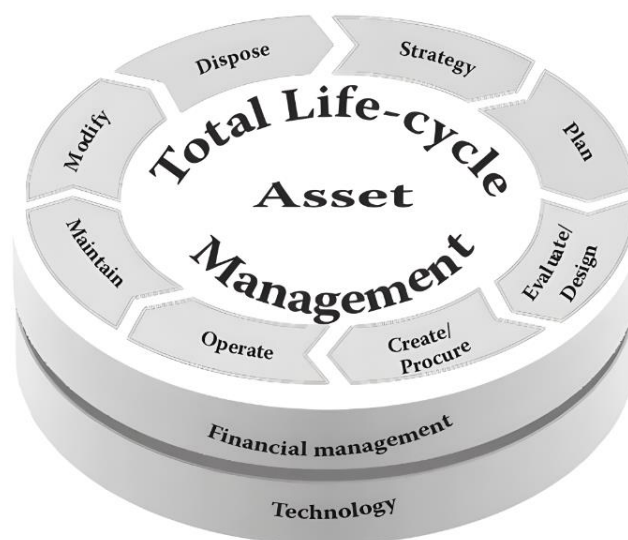
Con relación a este tema, una visión ampliada del ciclo de vida de los activos proporciona un nuevo nivel en la gestión gerencial, pues añade mayor calidad y cantidad de información en la toma de decisiones. La práctica de la gestión de activos en el ciclo de vida total (Total Life-Cycle Asset Management - TLAM) ofrece una perspectiva completa a través de las etapas de planificación y diseño, construcción, operación/explotación y, de cierre o disposición final. El método tradicional generalmente desestima o ignora las etapas dentro del ciclo de vida de los activos, y en consecuencia las soluciones gerenciales probablemente satisfacen criterios relativos de “mínimo costo” asociados a cada etapa, dejando de lado o sin observancia el comportamiento y desempeño de los activos en el horizonte total del ciclo de vida económica. Además, con frecuencia, las partes interesadas que participan en cada etapa en el proceso de decisiones tienen roles y motivaciones independientes, con ausencia de actuaciones colaborativas y de intercambio de información, que impactan sobre el cumplimiento de los objetivos empresariales.

La Figura 12 siguiente tomada de la referencia “Asset Classes and the World of Life-Cycle Asset Management”, de los autores Joel McGlynn & Frank “Chip” Knowlton, despliega el ciclo de vida de los activos en sus etapas e introduce dos componentes transversales dentro

del marco empresarial, correspondientes a los atributos tecnológicos *-Technology-* y de gestión financiera *-Financial Management-* que acompañan a cada periodo del horizonte económico.

Figura 12

Ciclo de vida total en la Gestión de Activos



Nota. La figura despliega el ciclo de vida de los activos en sus etapas. Tomada de *Asset Classes and the World of Life- Cycle Asset Management*, por Joel McGlynn & Frank “Chip” Knowlton, 2010.

En consecuencia, el modelo integral de información contempla el análisis del Costo del Ciclo de Vida para tomar decisiones estratégicas sobre alternativas operacionales, desde el punto de vista del inversionista/propietario/operador en desarrollo de la gestión de activos de infraestructura vial, como quiera que la combinación óptima de CAPEX y OPEX incidirá notablemente en el periodo de la etapa de operación/explotación de las instalaciones. (Amendola y Depool, 2017)

Los inversionistas, asset managers y operadores propenden por disponer de activos eficientes y de generación de valor, alineados con los objetivos estratégicos de su organización.

En este sentido, los modelos integrales de información facilitan tal propósito, pues además de obtener mejor información se busca finalmente gestionar la infraestructura para optimizar su operación, con “activos de alto rendimiento”.

Con ese propósito, es importante determinar la efectividad y observar el resultado de la gestión de activos viales a lo largo de todo el ciclo de vida, desde su etapa de diseño hasta el final de su horizonte económico, en particular se debe realizar una evaluación integral de las instalaciones para asegurarse de que los objetivos de “alto rendimiento” se cumplan durante el periodo del ciclo de vida del activo.

Entonces, una apropiada gestión de la infraestructura vial, con modelos integrales de información, debe apuntar a un costo del ciclo de vida que comprenda el CAPEX y el OPEX, de tal forma que se logre maximizar el TOTEX (*TOTAL Expenditure*), cumpliendo con el nivel de prestación del servicio, tanto en términos funcionales como de calidad, y bajo la hipótesis de absoluto respeto con el medio ambiente.

Pues bien, con la aplicación de modelos integrales de información a la gestión de activos, se obtiene una mejor estimación de los presupuestos de CAPEX, al contar con mediciones más ajustadas a la realidad de las inversiones; en esta misma línea, se dispone de mayor calidad y cantidad de información para los procesos de toma de decisiones, con la oportunidad requerida para maximizar el uso de los recursos. De otro lado, se puede simular desde la etapa de ‘planeación y diseño’ el desempeño o comportamiento de la infraestructura durante el periodo de operación/explotación, para plantear acciones de mejoras desde el inicio del ciclo de vida del activo; esta práctica se identifica en la actual literatura de “Asset Information Model - AIM”. como “Think of End Before Beginning”, piense en el final antes de comenzar.

El objetivo principal de generar valor se materializa al lograr maximizar la rentabilidad de los activos; en tanto, es muy importante analizar los costos inherentes al ciclo de vida de la infraestructura, para así plantear soluciones fundamentales en la gestión de activos. En este aspecto, es de suma trascendencia el conocimiento y examen de las diferentes inversiones y costos a lo largo de las etapas del horizonte económico de las instalaciones, en términos de CAPEX y OPEX. En tal circunstancia, las decisiones tenderán a establecer la mejor combinación entre los costos de capital y los costos operacionales para optimizar el Costo Total del Ciclo de Vida - TOTEX, con las bondades evidentes de esta propuesta de valor al aprovechar la flexibilidad financiera en la asignación de los costos y la utilización razonable de las fuentes de financiación.

La gestión gerencial implica tener planificadas estas inversiones CAPEX y costos OPEX para determinar apropiadamente los planes de negocio y los presupuestos operativos en las etapas de diseño y de construcción, y posteriormente su competencia comprende el seguimiento y control de la ejecución presupuestal, los resultados de las operaciones y la situación financiera, en la medida que se vaya avanzando en el periodo de operación/explotación de los activos.

El análisis del Costo del Ciclo de Vida -CCV- es un elemento primordial en el proceso de toma de decisiones, puesto que posibilita reunir la teoría económica sobre el aprovechamiento de los recursos limitados y el tema central de infraestructura sostenible, en un ejercicio integral que considera toda la vida económica de los proyectos/activos. En la práctica, se pretende extender el ciclo de vida de las instalaciones, con la incidencia natural de lograr un menor CAPEX y OPEX al contar con un sistema apropiado de gestión de activos.

Durante todo el ciclo de vida la implementación de las Tecnologías de Información (TI) constituye un componente esencial para el éxito en la Gestión de Activos, como quiera que el

proceso de toma de decisiones requiere de la disponibilidad de información adecuada, oportuna y confiable. Con esta premisa y, de acuerdo con Sasha Reed citada en López (2020), “el objetivo de BIM es atar la valiosa información creada, distribuida y recopilada durante el ciclo de vida del proyecto; ultimadamente, remover las ineficiencias en nuestros procesos y cambiar la forma en que compartimos, distribuimos y hacemos uso de la información” (párr.8), podemos entender los beneficios derivados de la gestión gerencial de activos basada en la documentación estructurada, generada y consolidada a partir de todas las etapas del horizonte económico de las instalaciones.

Un Modelo Integral de Información (BIM) es un vehículo de comunicación e integración entre las partes involucradas *-stakeholders-* en el proceso de Gestión de Activos que procuran obtener el mayor valor de su infraestructura, en condiciones adecuadas de calidad, tiempo y costo. Por consiguiente, todos los actores/participantes deben comprender la naturaleza colaborativa de BIM en las etapas del ciclo de vida del proyecto/activo (Ferguson et al., 2011), y su aporte tan relevante en la toma de decisiones gerenciales. En tal circunstancia, es posible afirmar que existe absoluta correspondencia e interrelación entre la Gestión de Activos y el modelado de información BIM (Ferguson et al., 2011).

Expresada la idea anterior, otro beneficio específico que merece especial atención, está relacionado con la participación colaborativa a nivel de todos los actores o stakeholders en la gestión de activos con modelos integrales de información, y en particular con la participación de los usuarios finales de los servicios proporcionados por la infraestructura vial, permitiendo recoger las propuestas interesantes e infalibles de la demanda. De forma general, la tendencia es lograr reducir los riesgos por no cumplimiento de los requerimientos y expectativas de todos los agentes interesados.

En este punto, es nominalmente poco significativo encontrar diferencias entre la comprensión fundamental de los modelos integrales de información y la asociación de estos modelos con disciplinas como Ingeniería de Valor, con sus componentes estratégicos de Lean Construction y/o Integrated Project Delivery; toda vez que al final los inversionistas, agencias estatales, constructores, operadores y usuarios, aspiran a disponer y ofrecer una mejor infraestructura o activo de alto rendimiento, con la participación colaborativa de todas las partes involucradas, pensando siempre en atender satisfactoriamente la demanda social del servicio.

Para lograr activos de alto rendimiento, los inversionistas y los gerentes de activos deben organizar un equipo de profesionales que les permita desde las etapas de planificación y diseño y de construcción obtener la infraestructura requerida con las mayores garantías de éxito, en procura de minimizar los riesgos asociados con el cumplimiento de los objetivos organizacionales. En tal dirección, es necesario replantear algunos procesos tradicionales entre las partes/actores interesados; en primer término, el enfoque metodológico de planificar las inversiones debe asegurar que las decisiones se tomen en la primera etapa del ciclo de vida, de tal forma que sean más oportunas y efectivas y, por supuesto, menos costosas. Así mismo, en esta etapa de ‘preinversión’ se debe dedicar el tiempo de cronograma y los recursos estimados para asegurar la programación física y financiera de las etapas siguientes.

En efecto, el alcance del modelo de operación/explotación de proyectos/activos viales se fundamenta en la Gestión de Activos dentro de un entorno BIM, como un agente facilitador en el funcionamiento apropiado de la infraestructura y la optimización de los costos durante la fase de operación/explotación, para permitir a nivel gerencial tomar las decisiones pertinentes con la suficiente información y la oportunidad temporal requerida a fin de mejorar la eficiencia y reducir el costo del ciclo de vida de las instalaciones.

De manera complementaria, para asegurar los objetivos de la investigación, se incorporan los novedosos enfoques metodológicos de Ingeniería de Valor, en particular de *Integrated Project Delivery* -IPD- y *Lean Construction* -LC-, aplicados a la Gestión de Activos de infraestructura vial basada en modelos integrales de información.

Finalmente, se pretende escalar los modelos integrales al nivel de la gestión gerencial en la etapa de operación/explotación, los cuales poco han sido estudiados o implementados en este contexto, en comparación con el grado de ingeniería alcanzado en las etapas de diseño y construcción, como se ha venido desarrollando ampliamente en los últimos años. Por lo tanto, desde la perspectiva de la Ingeniería de Consulta se presenta el modelo integral de información aplicado a la gestión de activos de infraestructura vial.

2.2.3. Gestión de la Información en el Ciclo de Vida

Product Lifecycle Management –*Gestión del Ciclo de Vida del Producto*– se ha desarrollado y aplicado de manera exitosa en el sector de la industria de la manufactura, en procesos de transformación de materia prima a un producto final, por ejemplo, en la industria automotriz y en la aeronáutica. La gestión de la información del producto en todas etapas del ciclo de vida es un proceso acumulativo de datos en el tiempo, con la participación de todos los actores o agentes involucrados desde el diseño, producción/ensamble, hasta su uso, mantenimiento y desecho. En tal sentido, la información obtenida es una representación del producto en forma virtual a lo largo de todo el horizonte de vida económica, que desde luego facilita la toma de decisiones en las diferentes áreas de gestión empresarial.

Ahora bien, del concepto anterior de PLM cuyo objeto central es el producto, podemos pasar a la noción de gestionar un activo fijo simplemente extrapolando el proceso de manejo de la información para un bien tangible, de naturaleza física, intensivo en capital y con larga vida útil. Entonces, para el caso que nos ocupa de la infraestructura vial, los activos

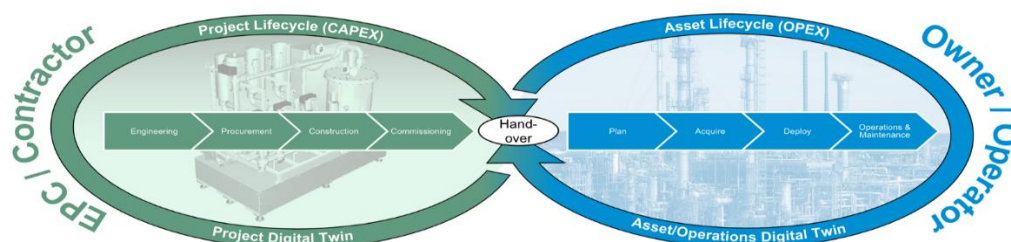
corresponden a las vías o carreteras propiamente dichas y todos sus componentes requeridos para prestar el servicio de movilidad y transporte a los usuarios, y que es necesario gestionar y gerenciar en todas las etapas del ciclo de vida en términos de eficiencia y control. En general, estos procesos de gestión son bastante complejos y su información se genera a partir de la dinámica propia en su desarrollo, que implica ante todo un serio reto empresarial.

Al consolidar todas las etapas, el modelo de negocio en infraestructura vial identifica dos actores o 'stakeholders' principales, desde la perspectiva de su participación en la ejecución y funcionamiento de las instalaciones físicas; de una parte, las etapas de 'planeación, estudios y diseños' y de 'construcción' son de responsabilidad de una empresa EPC, por las siglas en inglés "Engineering, Procurement and Construction", y de otro lado la operación/explotación de los activos se asigna a una organización especializada denominada empresa O/O, por su expresión en inglés "Owner and Operator". En líneas generales, podemos decir, que el EPC gerencia y gestiona el ciclo de vida del proyecto para entregar las instalaciones construidas al O/O que se encarga de la operación/explotación dentro ciclo de vida del activo.

En particular, en el modelo de negocio de Participación Público Privada -PPP-, también denominado Alianza Público-Privada -APP-, en el sector de infraestructura vial, estos dos actores empresariales previamente señalados están incorporados a una 'persona jurídica de derecho privado', que normalmente puede tener más socios/accionistas interesados en la APP -identificados como inversionistas estratégicos-, para finalmente actuar como el titular de la contraparte en la Asociación Público-Privada y representa al Inversionista de Capital -"Equity Investor".

Figura 13

Esquema EPC y O/O en el modelo APP.



Nota. Tomado de *PLM for Asset intensive Industries*, por SAP & Siemens, 2022.

El EPC y el O/O tienen retos compartidos y actividades con intereses conjuntos en relación con la gestión del activo de capital. Esta circunstancia se origina en el hecho de que ninguno de estos actores tiene una percepción completa de todo el ciclo de vida del activo; el EPC se centra en atender los requerimientos de los costos de inversión del proyecto -CAPEX- y adelantar las etapas de diseño y construcción, y el O/O se concentra en optimizar el rendimiento del activo en su etapa de operación/explotación. Como quiera que la vida económica de la infraestructura integra las diferentes etapas, finalmente las responsabilidades, contingencias y soluciones son compartidos entre estos dos agentes/stakeholders. Particularmente, muchos de los riesgos a los que se enfrentan los EPC y los O/O están asociados con problemas de información por pérdida sistemática de su valor, en cuanto a contenido y calidad, a lo largo del ciclo de vida. Estas circunstancias, se presentan con frecuencia en las actividades de migración y entrega de documentación al avanzar en las etapas de desarrollo de la infraestructura, con impactos adversos en la gestión gerencial de estos actores. Al respecto, las experiencias exitosas de industrias líderes, como la automotriz y la aeronáutica, en la adopción e implementación de la gestión del ciclo de vida del producto - PLM- constituyen una referencia obligada para el sector de infraestructura vial.

2.2.4. Interacción BIM-LC-IPD

Ingeniería de Valor -IPD y LC- en Proyectos de Infraestructura Vial

Durante esta fase, se logrará la apropiación de los conceptos, componentes y funcionalidades de la disciplina de Ingeniería de Valor, representada en las estrategias IPD y LC, que mediante una revisión sistemática de literatura en las bases de datos descritas en el numeral 5.2 permitirá mostrar prácticas, principios, relaciones, funcionalidades y sinergias para su aplicación en proyectos de infraestructura vial, y así consolidar una base sólida de fundamentos teóricos respecto a las bondades y beneficios de estos innovadores enfoques (Tohidi, 2011).

Se pretende abordar en primer lugar el método de *Integrated Project Delivery* –IPD-, con sus requerimientos esenciales para implementar procesos colaborativos que permitan tiempos de respuesta/entrega más rápidos y menores costos, como también prácticas integradas que lleven a solucionar la baja productividad y el desperdicio, el exceso de tiempo, los problemas de calidad y los conflictos durante la etapa de operación/explotación en proyectos de infraestructura vial (Asmar et al., 2013). De manera análoga, se tratará la filosofía *Lean Construction* -LC-, en cuanto a su objetivo fundamental de “aumento de la productividad considerando la satisfacción de las necesidades de los clientes”, y sus principios básicos de “justo a tiempo”, control total de calidad y mejora continua de procesos, prestando especial atención en las prácticas implementadas en proyectos de infraestructura vial en las diferentes etapas del ciclo de vida (Babalola et al., 2019).

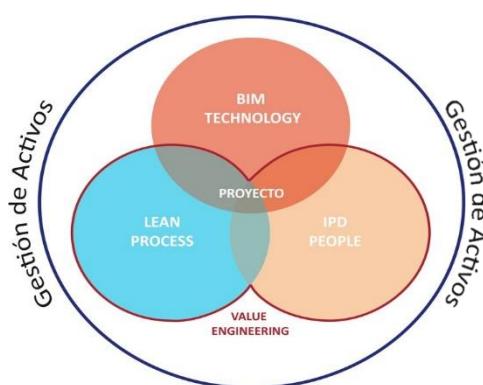
Integración de BIM, IPD y LC

En esta fase se estudiará la integración del modelado de información BIM y los enfoques de Ingeniería de Valor, IPD y LC, descritos en los numerales previos, para asociar y determinar el nivel de complementariedad en principios, conceptos, procesos y funcionalidades (Figura 14), en el entorno de la Gestión de Activos, privilegiando los objetivos de optimización

de procesos y recursos *-en cuanto a tiempo, costos y calidad-* con el propósito de obtener mayor generación de valor en la etapa de operación/explotación de la infraestructura, además de estudiar su utilización tanto a nivel vertical como horizontal. Para esta integración trilateral - BIM IPD LC- se prestará atención a la información y el conocimiento generado y acumulado en las anteriores etapas del ciclo de vida de las instalaciones.

Figura 14

Integración BIM, LC e IPD en la Gestión de Activos



Nota. La figura muestra la manera en cómo se determina el nivel de complementariedad en principios, conceptos, procesos y funcionalidades. Tomada y adaptada de 5 motivos por los que el BIM no acaba de aterrizar en la Industria, por BIM Forum Chile, 2018.

En este punto, la investigación permitirá establecer el estado de avance de las acciones para construir una estrategia que reúna los enfoques de Ingeniería de Valor de IPD y LC con la metodología BIM, a fin de responder a los desafíos de eficiencia, productividad e integración que demanda actualmente la naturaleza cada vez más compleja de los proyectos/activos de infraestructura.

El objetivo central en este tema es investigar si LC, IPD y BIM convergen a actuar juntos de forma complementaria y con la sinergia apropiada, para hacer frente a las presiones tecnológicas que exige la prestación de los servicios de infraestructura, y finalmente concluir

sobre la conveniencia, beneficios y retos de su interrelación. Entonces, se propone una revisión bibliográfica sobre la implementación de esta “tríada” relacionada con la Gestión de Activos en el sector de infraestructura; así mismo, se recurrirá al análisis de experiencias innovadoras de colaboración de estas tres materias, para observar los resultados y las soluciones a las novedades de integración.

La construcción conceptual del modelo de gestión integral de activos de infraestructura vial se realizará con un enfoque compuesto por la interacción de la metodología de trabajo *Building Information Modeling -BIM-* y de las estrategias para la ejecución de proyectos *Lean Construction -LC-* e *Integrated Project Delivery -IPD-*.

BIM se implementará como una metodología para la gestión de la información que ayudará a tomar decisiones con la mejor calidad de datos posible, gestionados de manera integral a través de todo el ciclo de vida del proyecto de infraestructura vial (Ocampo, 2015), y haciendo especial énfasis en la dimensión 7D de BIM que comprende la gestión de la infraestructura en su etapa de operación/explotación. LC permitirá reducir o eliminar las actividades que no agregan valor al proyecto y optimizar las actividades que sí lo hacen, con los beneficios que se describen en el numeral 2.3. Y finalmente, IPD se empleará para mejorar y enriquecer el trabajo colaborativo entre las partes o actores involucrados *-inversionistas, agencias de gobierno, diseñadores, constructores, operadores-*, con la finalidad de maximizar la generación de valor del proyecto; esto crea un proceso en el que todos los stakeholders *-grupos de interés multidisciplinarios-* trabajan como una sola unidad, reduciendo costos por efectos de economía de escala y con un uso adecuado de recursos (ESAN, 2019).

La integración de estos conceptos y enfoques metodológicos permiten una mayor relación interactiva entre las partes interesadas para actuar e intervenir sobre los distintos componentes o factores de decisión, presentados en la Figura 12, que mejoran la eficiencia -

costos, plazos, valor-, reducen riesgos de seguridad y garantizan la calidad en la gestión de proyectos de infraestructura, tal como se puede concluir en la reciente literatura sobre las ventajas, en múltiples áreas, que se obtienen al implementar estas metodologías y estrategias en conjunto (Fakhimi et al., 2016; Glick y Guggemos, 2009).

Figura 15

Interacción BIM, LC e IPD



Nota. La figura muestra los factores que rodean la interacción BIM, LC e IPD. Tomada de *Gestión ZCP*, por Zero City Project, 2018, Zero City Project.

En este modelo, se implementará BIM como la metodología que engloba la gestión integral de los activos durante la etapa de operación/explotación, correspondiente al periodo de mayor extensión en el ciclo de vida del proyecto. En esta dirección, la interacción con las estrategias de LC e IPD genera cambios positivos que se traducen en mayores facilidades para la toma de decisiones gerenciales en la gestión de activos.

El sector de infraestructura debe adaptarse a niveles de servicio a la demanda cada vez más exigentes, siendo necesario implantar métodos colaborativos que promuevan equipos interdisciplinarios de trabajo, donde todos los actores o partes interesadas puedan adoptar alternativas de solución oportunas y eficientes al disponer de toda la información pertinente, y

en cualquier caso siempre involucrando al cliente/usuario como el elemento central del proyecto.

Con ese propósito, para gestionar activos de forma colaborativa el modelo *Lean Construction* -LC- ofrece importantes beneficios, que unido a la metodología integral de información -BIM- y a formas modernas de relación entre clientes, proveedores y/o aliados de *Integrated Project Delivery* -IPD-, hacen que esta interacción tripartita permita modernizar al sector de infraestructura.

2.3. Metodología Design Science Research – DSR

A continuación, se expone el proceso adelantando para la planificación, análisis y desarrollo de todos los componentes de la investigación, a partir de la metodología “Design Science Research” -DSR- y de la literatura o bibliografía consultada que proporciona la línea base y la información relevante para producir el conocimiento posible en el campo de la gestión gerencial y tecnológica de activos de infraestructura vial.

2.3.1. Descripción

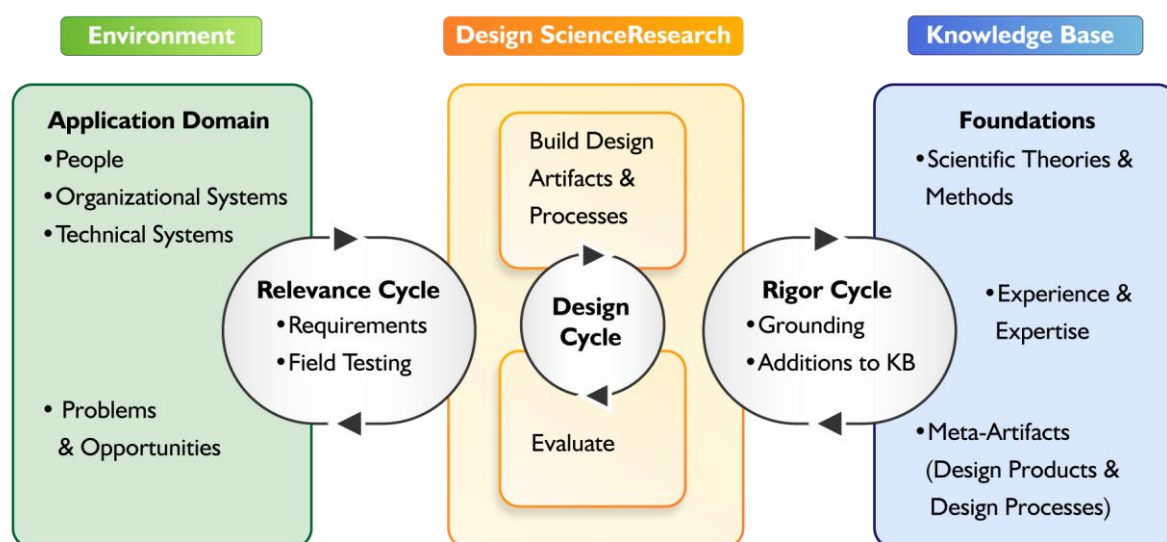
Desde hace algún tiempo en el campo de la ingeniería, las ciencias de la información y la gestión gerencial está tomando importancia la investigación a través de la metodología “Design Science Research” - DSR, cuya mejor traducción es la investigación científica basada en el diseño y la intención. Es una nueva forma de considerar y formalizar la actividad de investigación en esas disciplinas, mediante otra estrategia para producir conocimiento, con el nivel de rigor de las metodologías convencionales de las ciencias naturales. Las divergencias radican en que las ciencias naturales detallan, describen o descubren los fenómenos en el mundo, siempre buscando la verdad; y, de otra parte, en la ingeniería, los sistemas y la gestión se orienta la investigación a cambiar y transformar “la realidad”, se responde a la inquietud de cómo deben o deberían ser “las cosas”, con el fin de buscar la utilidad o uso de éstas. Desde

esa perspectiva, el valor o mérito del proceso está en sí la solución funciona o contribuye a mejorar la vida de las personas, en últimas si resuelve un problema a partir de la generación del conocimiento.

La metodología DSR propone la construcción de “artefactos” para proporcionar una solución apropiada a un problema previamente identificado en su dominio; en cualquier caso, la solución debe ser innovadora a un problema complejo. El proceso de construcción del artefacto está definido por iteraciones sucesivas de las actividades de diseño, construcción y evaluación para obtener la solución validada satisfactoriamente, lista para ser comunicada y liberada para su implementación. Según la literatura, se ilustran cuatro tipos de artefactos, clasificados en: Constructos (vocabulario y simbología conceptual de un dominio), Modelos (conjunto de abstracciones, representaciones y proposiciones o sentencias que expresan relaciones entre constructos), Métodos (algoritmos y prácticas, conjunto de pasos de una tarea, conocimiento de la manera de hacer algo), e Instancias (operacionalización de constructos, modelos y métodos; implementaciones y prototipos).

Figura 16

Proceso de la metodología Design Science Research



Nota. La figura muestra el marco conceptual para comprender, ejecutar y evaluar la investigación bajo la metodología DSR. Tomada de *A Three Cycle View of Design Science Research* por Hevner A. R, 2007, *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19:(2), pp. 87-92.

El proceso DSR que comprende tres ciclos: Ciclo de Relevancia, Ciclo de Diseño y Ciclo de Rigor. El Ciclo de Relevancia identifica, define y describe el dominio del problema, junto con las investigaciones sobre el estado del arte de la posible solución del problema. En el Ciclo del Diseño se iteran las actividades de especificaciones, construcción y evaluación del artefacto. Y, por último, en el Ciclo de Rigor se evidencia que el diseño esté soportado en teorías científicas, métodos y prácticas reconocidas y aceptadas.

En cuanto al proceso de determinar la viabilidad del artefacto se hace necesario evaluar fundamentalmente su utilidad, calidad y eficacia mediante metodologías disponibles en la base de conocimientos, dependiendo de las propiedades del artefacto diseñado y los indicadores de los factores de análisis, con el propósito de conocer los beneficios obtenidos por las partes interesadas del objeto diseñado como solución en el dominio de la investigación, para seguidamente proceder con la publicación y divulgación de los resultados. A tal efecto, los métodos descriptivos de evaluación se deben aplicar particularmente en artefactos innovadores que evidencien amplias bondades tecnológicas y de gestión en las disciplinas de ingeniería, ciencias de la información y management; en DSR es importante responder a las preguntas de ¿Que utilidad se obtiene del artefacto? y ¿Que se explica ese beneficio? En la tabla siguiente se presentan los métodos de evaluación.

Tabla 3*Métodos de Evaluación en DSR*

| Table 2. Design Evaluation Methods | |
|------------------------------------|--|
| 1. Observational | Case Study: Study artifact in depth in business environment |
| | Field Study: Monitor use of artifact in multiple projects |
| 2. Analytical | Static Analysis: Examine structure of artifact for static qualities (e.g., complexity) |
| | Architecture Analysis: Study fit of artifact into technical IS architecture |
| | Optimization: Demonstrate inherent optimal properties of artifact or provide optimality bounds on artifact behavior |
| | Dynamic Analysis: Study artifact in use for dynamic qualities (e.g., performance) |
| 3. Experimental | Controlled Experiment: Study artifact in controlled environment for qualities (e.g., usability) |
| | Simulation – Execute artifact with artificial data |
| 4. Testing | Functional (Black Box) Testing: Execute artifact interfaces to discover failures and identify defects |
| | Structural (White Box) Testing: Perform coverage testing of some metric (e.g., execution paths) in the artifact implementation |
| 5. Descriptive | Informed Argument: Use information from the knowledge base (e.g., relevant research) to build a convincing argument for the artifact's utility |
| | Scenarios: Construct detailed scenarios around the artifact to demonstrate its utility |

Nota. Tomado de Design Science in Information Systems *Research*, por Hevner et al., 2004, MIS Quarterly, vol. 28, no. 1, pp. 75-105.

En síntesis, esta investigación plantea un producto, a nivel de artefacto dentro de la metodología empleada “Design Science Research “- DSR, consistente en un ‘modelo conceptual de gestión de activos’ entendido como una representación del dominio de una solución con relación a la problemática identificada de gestión de la información en el proceso de toma de decisiones sobre las inversiones en infraestructura vial. El ‘modelo conceptual’ requiere de procesos administrativos de recursos físicos o materiales, financieros y de talento humano, que apoyados por las innovaciones tecnológicas de los ‘modelos integrales de información’, contribuyen a incrementar la generación de valor de los activos.

De manera específica, el modelo de dominio es de tipo conceptual utilizado para representar los elementos estructurales y sus limitaciones dentro de la solución propuesta a la problemática previamente definida. Este modelo describe y documenta las diversas entidades, sus atributos y relaciones, además de las restricciones que rigen la integridad del modelo

estructural que comprende el dominio del problema. También, si es del caso, el modelo puede incluir varios esquemas conceptuales referidos a un área temática particular del dominio o a un subconjunto de especial interés.

2.3.2. Desarrollo

En primera instancia, la metodología debe definir y determinar el concepto de la planificación de proyectos de infraestructura vial, para precisar los fundamentos y bases teóricas que permitirán la asociación e integración de este concepto con la etapa de operación/explotación de los activos. En especial, cuando se hace referencia a la etapa de planificación, se afirma que es aquella función de la gestión gerencial base para todo el ciclo de vida del proyecto, en la que se determinan los objetivos, planes, programas, alcances, y demás aspectos propios de esta primera estimación, detallando la forma estratégica de alcanzarlos, asignando tiempos y orden a las tareas, por lo tanto, esta etapa nos presenta un modelo teórico para las etapas posteriores (Kartam y Levitt, 1990; L. Toro, 2012).

Ahora, la presente investigación establece un enfoque integral para los proyectos de infraestructura vial, de tal manera que deben ser definidos, entendidos y asociados a la etapa de operación/explotación, desde las primeras actividades de planeación, considerando la importancia de la magnitud de las inversiones de capital CAPEX y los costos de operación/explotación OPEX durante el ciclo de vida, e igualmente las condiciones y necesidades sociales y el impacto generado sobre el crecimiento y desarrollo de la economía (Van Damme et al., 2016). De otro lado, también es fundamental apreciar las limitaciones de recursos económicos, las dificultades de la planificación a largo plazo y la problemática inherente del sector de infraestructura *-falta de tecnología, sobrecostos, incumplimientos de los contratos, entre otros-*, en particular en países en desarrollo, y un espacio específico se debe

conceder al uso transparente de los recursos públicos como fuente de financiación de la conservación y expansión de la infraestructura vial.

La planificación de proyectos es un elemento esencial dentro del proceso de gestión gerencial para adelantar apropiadamente las diferentes etapas del ciclo de vida de los activos, propiciando un desarrollo estructurado del conjunto de componentes y actividades en condiciones controladas de tiempo, calidad y recursos, con el fin de lograr los objetivos del proyecto. Los resultados se traducirán en generar una visión objetiva del horizonte de vida útil, reducir los niveles de incertidumbre y mitigar los riesgos, maximizar el aprovechamiento de recursos y tiempo, a través de una percepción más integral y sistémica (Área de Proyectos del ILPES/CEPAL, 2012; M. Parraga, 2014). De esta manera, se orienta la investigación hacia la asociación de las actividades y procesos en las etapas de planeación-diseño y de construcción que serán los *inputs* para abordar la etapa de operación/explotación.

2.3.3. Producto

El estudio propone el conocimiento general del estado del arte y las perspectivas de la tecnología BIM, que mediante una revisión de literatura busca consolidar la información relevante y el englobe de aspectos esenciales y conceptos asociados, que permitan la apropiación de la metodología de forma completa. Esta fase consistirá en el aprendizaje y comprensión de los múltiples beneficios generales de BIM en la gestión de proyectos (Fountain y Langar, 2018), el impacto de esta tecnología en la actualidad, como también el entendimiento de sus 7 dimensiones -7Ds-, abarcando desde las tres dimensiones geométricas ya conocidas hasta aquellas que comprenden tiempo 4D, costos 5D, sostenibilidad 6D y una última dimensión 7D referente a la Gestión Activos, que permite organizar, administrar y controlar las instalaciones en la etapa de operación/explotación.

Especial interés se dedicará a la Dimensión 7, en razón a la novedad de su incorporación en el modelado BIM y a la natural correspondencia con la presente investigación, toda vez que comprende las actividades y procesos de la etapa de operación/explotación de un proyecto/activo dentro de su ciclo de vida económica, contribuyendo en la toma de decisiones con el objetivo de optimizar la generación de valor, al minimizar los costos y mejorar el servicio ofrecido. Esta dimensión se relaciona con la aplicación de la disciplina de *Asset Management* -Gestión de Activos-, basada en los principios, fundamentos y procesos establecidos en la familia de norma ISO 55000 de 2014.

Así, se ha logrado la apropiación de BIM con un enfoque determinado hacia la infraestructura vial a un nivel gerencial, dentro del marco teórico de la literatura científica y desde las correspondientes etapas de planeación-diseño y de construcción, como fundamento sólido y determinante previo a la etapa operación/explotación (Moreno, 2017). Para tal efecto, se han consultado documentos científicos en bases de datos como: Science Direct, Springer, Web of Science, ASCE Journals, Taylor y Francis Group, Wiley Library, EBSCO, Google, Academia, entre otros, obteniendo la información bibliográfica de la investigación.

Los proyectos viales se diseñan con una expectativa de vida económica extensa, con un costo del ciclo de vida concentrado significativamente en la etapa de operación/explotación en tanto que suele representar alrededor del 80% del costo total; no obstante, las decisiones más cruciales se toman en la etapa de planeación y diseño, determinando en gran parte el comportamiento futuro de las etapas siguientes de construcción y de operación/explotación.

Entonces, con tal premisa, se han identificado y examinado los procesos estructurales en la gestión de la información al implementar el uso del modelado BIM, como tecnología integral y método de trabajo colaborativo en las etapas de diseño, de construcción y de operación/explotación, pero con particular énfasis en ésta tercera etapa de prestación del

servicio de los activos viales, y en especial atendiendo a la toma de decisiones a nivel gerencial del funcionamiento de la infraestructura (Albis, 2008).

Otro asunto de indicar tiene relación con la importancia y beneficios de extender la aplicación de BIM a la etapa de operación/explotación, pues, aunque su adopción es muy escasa en esta etapa las expectativas de generar valor de los activos son muy amplias, al observar la composición periódica del costo de ciclo de vida que favorece y estimula los procesos de optimización de recursos. A su turno, se considerarán los retos y limitaciones del uso potencial del modelado integral BIM en esta etapa.

Sobre el tema, también es preciso mencionar las funcionalidades de BIM de frente a los requerimientos de documentación de los procesos en la operación/explotación de proyectos viales, ante la necesidad de tomar decisiones con la mayor información posible de alta calidad, para garantizar el objetivo final de ofrecer un servicio óptimo a los usuarios de las instalaciones. (Sierra Aponte, 2016).

La metodología propuesta comprende la apropiación y análisis del concepto de Gestión de Activos, abarcando una visión integral desde la perspectiva gerencial, incluyendo los distintos componentes *-normativo, administración del riesgo, mejores prácticas, nuevas tecnologías, entre otros-* que permitan la obtención de mayores rendimientos, reducción de costos operacionales, mejora en la prestación del(os) servicio(s), mitigación de impactos ambientales y optimización de recursos (Davis, 2017). Así, el resultado directo se traducirá en la extensión de la vida útil del proyecto de infraestructura y consecuentemente en generar mayor valor de las instalaciones.

La Gestión de Activos integra las funciones de planificación, ejecución y control en la etapa de operación/explotación con la gestión de los procesos fundamentales de inventario, materiales, recursos, mantenimiento, calidad, fallas, y solicitudes/pedidos, de frente a facilitar

las decisiones operacionales y de inversión de capital. En consecuencia, se pretende examinar de manera integral todos los elementos de la gestión, como se observa en la Figura 17.

Figura 17

Elementos a integrar en la Gestión de Activos



Nota. La figura expone los elementos de la gestión. Tomada de *Administración de Activos*, por SoftExpert Activo, 2019, SoftExpert.

En primer término, es necesario revisar el compendio de las normativas internacionales que determinan los lineamientos generales para llevar a cabo los procesos relacionados con la Gestión de Activos; en ese sentido, está el grupo de normas ISO 55000 de 2014, como marco de referencia para esta disciplina dentro de una organización y durante todo el ciclo de vida económica de la infraestructura, con especial acento en la administración del riesgo para la optimización de los costos y la obtención de un mayor valor de los activos.

Como quiera que el conjunto de normas ISO 55000 tienen como objetivo principal permitir a una organización generar valor de los activos, la investigación dará especial tratamiento al enfoque estructurado contenido en estas disposiciones, a fin de centrarse en la implementación de "procesos y actividades de planificación y toma de decisiones basados en el riesgo y orientados a la información que transforman los objetivos de la organización en planes de gestión de activos", según se indica en la misma disposición.

La investigación se ha ocupado de los conceptos y objetivos de la Gestión de Activos a nivel gerencial, para luego establecer los componentes estratégicos que aseguran la planeación, ejecución y control de las actividades, e igualmente respaldan las soluciones gerenciales en las etapas del ciclo de vida de las instalaciones.

En esa línea, la investigación concentra la atención en los métodos y técnicas innovadoras de Gestión de Activos que permitan a los gerentes obtener información de alta calidad y aplicar nuevas tecnologías que utilicen esta información en la toma de decisiones basadas en el riesgo. Así mismo, para completar el proceso de documentación es fundamental conocer los procedimientos de verificación, validación y certificación de los sistemas de Gestión de Activos, atendiendo a la pertinente normatividad ISO, con miras a plantear una aproximación acerca de los componentes esenciales para garantizar el reconocimiento de cumplimiento a los estándares internacionales del modelo conceptual resultante de la presente investigación.

En particular, se enfatiza en la adopción de prácticas modernas de gerencia de activos que consideran el ciclo de vida total de la infraestructura, con el propósito de optimizar las inversiones y alinear los proyectos con los objetivos de desarrollo sostenible -ODS- de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de los Estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas -ONU-.

3. Modelo Conceptual de Gestión Gerencial y Tecnológica de Activos de Infraestructura Vial

3.1. Modelo de Negocio de Participación Público-Privada en la Infraestructura Vial

La importancia de la infraestructura en el desarrollo económico y social de los países es evidentemente un aspecto de permanente ponderación para evaluar su capacidad de proporcionar bienestar a la población y, a la vez, determinar su nivel de eficiencia en la explotación de sus recursos; al respecto, el Foro Económico Mundial - WEF en su 'Reporte Anual de Competitividad Global' considera a la infraestructura como uno de los doce pilares de su investigación para determinar la importancia relativa de la competitividad de los países.

De otro lado, los fenómenos naturales, los impactos del cambio climático, el aumento vegetativo de la población y la natural obsolescencia de la propia infraestructura, generan la necesidad de expansión de las instalaciones e igualmente la optimización y modernización de los activos existentes. En particular para el sector de infraestructura vial, se puede afirmar que se requiere adelantar nuevos proyectos de inversión de sistemas de transporte, para atender la demanda y también para conservar, habilitar y mejorar las instalaciones actuales. En esos términos, los requerimientos corrientes y futuros de inversión son muy apremiantes y notablemente intensivos en capital, que se enfrentan a las restricciones presupuestarias de las finanzas públicas de los países, independientemente de su grado de desarrollo, con amplios espacios para emplazar la financiación del sector privado a fin de lograr el balance de fuentes de recursos. Esta alternativa de financiamiento privado ha dado lugar al modelo de negocio de Participación Público-Privada PPP o Asociación Público-Privada APP, configurando interesantes estrategias financieras para atender las necesidades de infraestructura vial inherentes al desarrollo económico, social y sostenible de los países.

En primera instancia, el origen de la APP surge en el evento que el sector público identifica una situación estructural de déficit de recursos financieros para ejecutar las etapas del ciclo de vida de los proyectos y/o activos viales; en consecuencia, ese desfinanciamiento abre la posibilidad de arbitrar fondos de capital provenientes de inversionistas privados. En esa perspectiva, hay múltiples opciones de Participación Público-Privada que surgen como modalidades de asociación para compartir riesgos, proveer financiamiento y realizar todas o algunas -las que se definan en la APP- de las etapas de ‘estudios y diseños’, ‘construcción’, y ‘operación/explotación’ de la infraestructura vial.

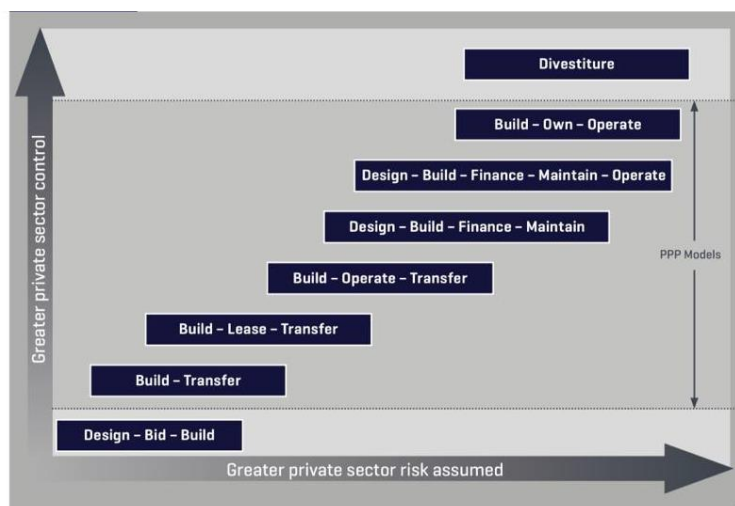
A nivel mundial, desde la década de los años 90 las Asociaciones Público-Privadas han sido una opción preferente para desarrollar proyectos de infraestructura vial, especialmente de gran tamaño físico y de alta inversión; en ese sentido, su aplicación se puede clasificar en dos enfoques estratégicos, un primer grupo presente entre 1990 a 2005 en respuesta a las necesidades de financiamiento de los gobiernos para acometer sus programas de inversión en infraestructura vial, encontrando la solución en el sector privado como principal fuente de recursos y, al tiempo, abrir un mayor espacio al capital de inversión en el renglón de servicios e infraestructura pública, más por iniciativas e intereses de la política en auge del momento de ‘Economía de Mercado’ (Zhang y Kumaraswamy, 2001). De manera cronológica aparece, a partir de la mitad de la primera década del presente siglo, un segundo grupo más preocupado por principio de eficiencia técnica y económica, en forma tal que primara la relación calidad-precio o conceptualmente denominada en la literatura ‘Valor por Dinero’, con mayor atención a transferir riesgos según la mejor posición de las partes -público y/o privado- para su manejo. Los desfases en materia de costos, cronogramas, calidad del servicio por confiabilidad y mantenimiento, dieron lugar a trasladar estos riesgos al sector privado; además, de estimar mayores beneficios para los usuarios por las innovaciones empresariales y tecnológicas ofrecidas.

Estos dos grupos de PPP han sido ampliamente utilizados por los países para el desarrollo de su infraestructura pública; no obstante, tienen enfoques y objetivos diferentes, uno basado en políticas fiscales con el propósito de aprovechar la financiación privada para atender las necesidades de inversión pública, y otro bajo criterios de ponderación del servicio con el objetivo de optimizar el uso de recursos y lograr mayores niveles de eficiencia en la prestación de servicios (Aziz, 2007).

En estas circunstancias, desde la perspectiva de sostenibilidad financiera, el primer grupo depende de la demanda del servicio y las tarifas del usuario, es el caso de los modelos de “construcción - operación - transferencia” y de “construcción - transferencia - operación”, conocidos como BOT y BTO respectivamente, por sus siglas en Inglés; el otro grupo, además de tener presente las características del mercado reconoce la importancia de la participación del sector privado en términos de eficiencia, innovación y gestión tecnológica en la prestación del servicio, y aparecen los modelos de “diseño, construcción - financiamiento - operación - transferencia” (DBFOT: Design-Build-Finance-Operate-Transfer), y en su modalidad más excelsa se denomina “Project Finance”; también aparecen las demás variantes de PPP como BOT (Build-Operate-Transfer), DBOM (Design-Build-Operate-Maintain), BOO (Build-Own-Operate), BOOT (Build-Own-Operate-Transfer), DBFO (Design-Build-Finance-Operate), ROT (Rehabilitate-Operate-Transfer) y BLT (Build-Lease-Transfer), entre otros. La **Figura 18** ilustra los modelos de negocios de APP en función del control de la gestión y del riesgo asumido por parte del sector privado.

Figura 18

PPP Models



Nota. La figura ilustra los modelos de negocios de APP. Tomada de *BIM Execution Framework for early-stage estimating in PPP projects*, por RICS Research, 2019, RICS Research.

3.2. Transformación Digital y Gerencia de Activos

La gestión de activos complementada con la aplicación de los modelos integrales de información debe partir de manera estratégica desde la perspectiva de los usuarios finales, como el eslabón principal de la cadena de valor del servicio ofrecido por la infraestructura.

Con esa premisa o hipótesis de la presente investigación, los inversionistas y los gestores de activos tienen a su disposición las nuevas tecnologías de los modelos de información, como una estrategia empresarial con el objeto de atender apropiadamente las necesidades de la demanda y administrar en la debida forma los riesgos inherentes a sus inversiones, en cumplimiento de sus planes de negocios. Esto compromete la dimensión de los modelos integrales de información, en su aplicación a la gestión de activos, como una innovación tecnológica que crea un escenario más propicio y confiable para gerenciar y tomar decisiones sobre las inversiones en infraestructura.

En consecuencia, en este entorno los modelos se convierten en “Business Information Model”, modelo de información empresarial o de negocio, que al ser aplicado a la gestión de activos da como resultado o producto de la investigación un Modelo de Información de Gestión de Activos - “*Asset Management Information Model*”, que precisamente comprende la solución a la problemática previamente identificada. En todo caso, el modelo de información de gestión de activos se origina en una idea estratégica de la organización a partir de la implementación de la política de gestión de activos conforme a la serie de normas ISO 55000 de Asset Management.

La idea central de la gestión de activos basada en modelos integrales de información, que se presenta en esta investigación a nivel documental, parte de la esencia del proceso estratégico de la organización, al aprobar por la alta dirección la decisión de adelantar un proyecto de inversión que comprende un nuevo activo requerido para garantizar el cumplimiento de los objetivos misionales. Con esta decisión, la organización debe emprender un conjunto de acciones de planificación que precisen los requerimientos de orden empresarial del plan de negocios.

Como etapa final de la investigación, se propone el diseño conceptual de un modelo integral de información, con base en la metodología BIM, que acoja la disciplina de Ingeniería de Valor a través de las estrategias IPD y LC, para la gestión gerencial y tecnológica de activos de infraestructura vial, obteniendo un modelo que comprenda los procesos y actividades de la etapa de operación/explotación. El objetivo del modelo consistirá en planificar, administrar, controlar y gestionar de manera eficiente y óptima la prestación de los servicios de estos activos, para generar mayor valor en la explotación de las instalaciones.

Con este objetivo, se acude a la especialidad de la Ingeniería de Consulta con el fin de contribuir a “llevar la tecnología al servicio de la sociedad” (*según definición de la FEPAC*),

mediante la construcción de los términos de referencia para proveer servicios de consultoría orientados a la organización económica del conocimiento, que permita transferir y aplicar el diseño conceptual del modelo integral de información para la Gestión de Activos en el sector estratégico de infraestructura vial (Torres, 2008).

Como se expresó en el numeral 4.4 de la presente investigación, de manera especial la investigación se centra en la dimensión 7D de BIM, con el objeto de formular un modelo integral de información para la Gestión de Activos de infraestructura vial en la etapa de operación/explotación, a partir de la información producida, escalada y consolidada a través de las diferentes etapas del ciclo de vida económica, con el propósito particular de tomar decisiones de inversión para optimizar la generación de valor de los activos. En efecto, el modelo se centrará en la Gestión de Activos dentro de un entorno BIM, como un agente facilitador en el funcionamiento apropiado de la infraestructura y la optimización de los costos durante la fase de operación/explotación, para permitir a nivel gerencial disponer de la información suficiente y con la oportunidad requerida a fin de mejorar la eficiencia y reducir el costo total del ciclo de vida de las instalaciones.

De manera práctica y específica, esta investigación plantea una solución *-desde la perspectiva gerencial y tecnológica-* consistente en un modelo de gestión de activos basado en la aplicación de modelos integrales de información, que describe y representa el conjunto de procesos que se realizan en una organización responsable de los negocios de infraestructura vial, especificando las actividades, agentes y roles, y reglas de cada proceso, con el fin de facilitar la toma de decisiones para maximizar la generación de valor de los activos durante todo el ciclo de vida económica.

Con la tecnología disruptiva de “Digital Twins”, dentro de la transformación industrial 4.0 aplicada al sector de infraestructura vial, surgen nuevos conceptos y modelos de gestión

denominados de manera equivalente como “Digital Roads”, “Smart Roads”, o “Digital Twins for Roads”, para articular y administrar toda la información a partir de los procesos, la tecnología y los agentes o partes interesadas, en las etapas de ciclo de vida de la gestión de activos.

De forma específica, en el modelo conceptual, los procesos producen datos que se recrean como información para ser procesada y analizada a través de recursos tecnológicos de la industria 4.0, incluida las innovaciones en materia de conectividad, para facilitar en tiempo real la facultad de toma de decisiones gerenciales en las etapas de estudios y diseños, de construcción y de explotación de la infraestructura vial.

Ante todo, se plantea un modelo de gestión que tenga como eje central al “customer”, al usuario final de la infraestructura del servicio público de transporte, siempre buscando mayores beneficios sociales en términos de ahorros de tiempo de viaje y mayor seguridad vial, así como de satisfacción en la calidad del servicio para lograr una experiencia notable que impacte positivamente en el nivel de vida de la población.

Este objetivo se logra, siempre y cuando solucionemos la problemática de gestión de la información descrita inicialmente, que se traduce en la pérdida sistemática de valor de la documentación a través de las etapas del ciclo de vida de los activos viales; en consecuencia, el modelo conceptual de gestión gerencial que se plantea preserva la cantidad y la calidad del acervo informático para minimizar el riesgo empresarial en la toma de decisiones de la alta dirección.

Al respecto, el modelo de gestión junto a los recursos tecnológicos de la industria 4.0, facilitarán las actividades de ingeniería predictiva e ingeniería prescriptiva, que permitan predecir el comportamiento real de las instalaciones durante su ciclo de vida, e igualmente incorporar procesos de analítica avanzada para automatizar decisiones tácticas de coyuntura y

determinaciones estratégicas de largo plazo, con la introducción de soluciones de inteligencia de negocios.

El diseño conceptual del modelo gerencial de gestión de activos viales constituye una transformación tecnológica en la visión estructural de generación de valor dentro de la política pública del sector, orientada a la misión de contribuir efectivamente al beneficio integral de la sociedad. En efecto, se privilegia el interés colectivo sobre la rentabilidad particular de los inversionistas privados, bajo un pensamiento económico moderno de generación de valor para lograr mayor desarrollo y equidad de la población en general.

Los procesos gerenciales de gestión de activos están basados en los datos del sistema físico, que al convertirse en información por actividades de interpretación y análisis soportan la toma de decisiones sobre el manejo de los activos; luego, en tales circunstancias, de la cantidad y calidad de la información depende la generación de mejores determinaciones para optimizar la gestión. Los gerentes encargados de la gestión de activos propenden por la información objetiva -confiable, relevante, actualizada- con el fin de determinar las soluciones más pertinentes a las contingencias propias del sistema (IAM, 2015).

En esa misma línea, los gemelos digitales proveen una utilización innovadora de la información en formato digital, que expresa la gran capacidad para representar la obtención de valor de los activos, en este caso de infraestructura vial, y conducir a tomar decisiones mejor informadas a lo largo del ciclo de vida económica de las instalaciones. La propiedad de facilitar y respaldar la gestión gerencial de activos viales que evidencian los Digital Twins al configurar un circuito cerrado entre los subsistemas físico y digital, emula y confirma el proceso continuo del ciclo PHVA -planificar, hacer, verificar y actuar- de la gestión de activos (Macchi et al., 2018).

Ahora bien, como quiera que el proceso es continuo y cíclico el gemelo digital tiene la facultad de acumular la información para crear una base de datos especial de conocimiento sistémico, con el propósito de lograr un mejoramiento continuo en la gestión gerencial de la infraestructura y de suma utilidad en la implementación de aplicaciones de inteligencia artificial en el campo de la ingeniería predictiva y prescriptiva (Tao et al., 2018).

La visión moderna de la gestión de activos viales sugiere dos planos o dimensiones de actuación que la identifican como un proceso inteligente, de una parte las decisiones gerenciales abordan un horizonte delimitado por las etapas del ciclo de vida; y por otro lado, el proceso tiene una hipótesis fundamental consistente en la transformación digital de este sector económico, que aprovecha la información y la tecnología para facilitar la toma de decisiones y permitir la gestión de la infraestructura ante circunstancias coyunturales de tiempo presente, como a nivel de acciones de orden estructural de mediano y largo plazo en la generación de valor de los activos (TMH22, 2013).

En la etapa de operación/explotación de las instalaciones, bajo un esquema de negocio de Project Finance, caracterizado por el extenso periodo de explotación y la dinámica compleja de las actividades e interrelaciones contractuales y las contingencias extraordinarias entre los agentes/stakeholders, determinan la necesidad de disponer infaliblemente de una información estructurada, confiable, segura, accesible y colaborativa. Para el efecto, la implementación de la tecnología de gemelos digitales tiene el potencial de contribuir integralmente en la gestión gerencial de la infraestructura, minimizando en especial los riesgos empresariales inherentes al manejo y uso de la información del modelo de negocio (Ouertani et al., 2008).

La gestión de activos promueve un enfoque sistémico que favorece la adopción tecnológica de Digital Twins, por consiguiente, la integración de procesos se puede facilitar al unificar e identificar las actividades gerenciales del ciclo de vida de la infraestructura física con

el circuito cerrado de la información del subsistema virtual (data-análisis-decisión-acción), para crear un modelo autónomo de la gestión de activos viales.

En el modelo de negocio de participación público-privada PPA, bajo el esquema de Project Finance, propio en el dominio del sector de infraestructura vial, la gestión de activos es asignada al agente ‘Operator’, por responsabilidad delegada del propietario del activo - ‘Owner’- generalmente la Agencia del Estado encargada del sector; en consecuencia, se puede advertir que la etapa de operación/explotación está asociada con la calidad del servicio y la generación de valor económico y social de las instalaciones. Al respecto, las decisiones acertadas del agente operador son de suma importancia y absoluta competencia, en línea con los términos, condiciones, indicadores y parámetros establecidos por la Entidad del Estado para la operación/explotación de la infraestructura vial y acordados contractualmente por las partes en la PPA, a efectos de privilegiar ante todo el concepto de remuneración al privado, en este caso el operador, de “generación de valor por dinero”.

Con el fin de cumplir las obligaciones derivadas de modelo de negocio, el operador debe gestionar la información multidimensional -tanto discreta como continua- para tomar las mejores decisiones sobre la explotación del activo, incluyendo datos relacionados con el estado físico de las instalaciones, funcionamiento, rendimiento, costos operacionales, costos de mantenimiento y reposición, nivel de prestación del servicio, demanda de transporte, tiempos de operación, presupuestos financieros, entre otros registros y cifras de esta naturaleza. En consecuencia, la gestión de la información se convierte un elemento fundamental para la gobernanza de la infraestructura vial.

3.3. Tecnología Digital Twins

De hecho, los Digital Twins han sido recursos tecnológicos indispensables en las etapas de “planeación/estudios/diseños” y de “construcción“, como normalmente ha ocurrido con los

modelos integrales de información; no obstante, su aplicación en la “operación/explotación” de infraestructuras advierte un futuro promisorio en la transformación del sector, al proporcionar de una parte una nueva práctica de trabajo colaborativo entre los agentes interesados y, de otro lado, ofrecer una mayor comprensión y conocimiento sobre el horizonte de toda la vida económica de los activos, con una visión de sostenibilidad integral para tomar decisiones orientadas a suministrar mejores bienes y servicios a la población en general. La incorporación de las innovaciones de la industria 4.0, como ML, IoT, AI, incluyendo el mundo virtual del metaverso, han permitido y continuarán la creación de sistemas dinámicos bajo Digital Twins que además de simular pueden predecir y prescribir las actividades y comportamientos de los activos de infraestructura en su etapa de explotación a lo largo del ciclo de vida.

La tecnología Digital Twins crea una reproducción virtual en tiempo real con una visualización inmersiva y total de la información de las instalaciones, con el objeto de entregar a la gestión gerencial de activos de infraestructura las utilidades requeridas para lograr soluciones digitales que se traducen “ipso facto” de manera efectiva al sistema real, garantizando obtener mayor valor en la prestación de los servicios a los usuarios finales.

En última instancia, a mediano y largo plazo, se presume que esta integración entre tecnología y gestión de activos se despliega a través de toda la cadena de suministro, para originar gemelos digitales de infraestructura abiertos y continuos, donde las decisiones y acciones de inclusión social se suman a los beneficios ambientales derivados de los objetivos de desarrollo sostenible -ODS- intrínsecos y transparentes en todas las etapas del ciclo de vida de los activos de infraestructura.

Con los gemelos digitales se facilita la comunicación e interacción entre disciplinas o dominios de conocimiento, a partir del trabajo colaborativo entre todos los agentes o partes

interesadas, por ejemplo en el diseño del proyecto y la gestión de activos, en esa etapa se pueden evaluar diferentes alternativas técnicas del proyecto a nivel de diseño conceptual y, a su turno, las decisiones sobre modificaciones y/o actualizaciones del activo son más oportunas y pertinentes al considerar su ciclo de vida. Los modelos digitales proporcionan la información para visualizar, gestionar de forma colaborativa y supervisar los cambios sobre la infraestructura, durante el proyecto y en la etapa de operación.

3.4. Modelo Conceptual de Gestión de Activos

Con las novedades de la industria 4.0, los modelos integrales de información han evolucionado hacia la tecnología Digital Twins de reciente adopción en el sector de infraestructura, de preferencia en construcciones verticales en la etapa de estudios y diseños; con gran potencial de aplicación en la gestión de activos lineales y durante todo su ciclo vida. Los gemelos digitales representan de forma virtual las instalaciones físicas correspondientes y personifican la dinámica real de sus actividades a lo largo de las diferentes etapas de la vida económica, produciendo toda la información y documentación digital para facilitar y adelantar los procesos de toma de decisiones dentro de la gestión gerencial de activos.

Entonces, podemos precisar que la administración de la base informática reside en el modelo Digital Twins, que alimenta los algoritmos y aplicaciones de inteligencia artificial para disponer de la información necesaria con el objeto de abordar las soluciones gerenciales en entornos de ingeniería predictiva en el corto plazo o de coyuntura y, de otra parte, en ambientes de ingeniería prescriptiva de alcance estratégico dentro del marco empresarial de la gestión de activos viales, en un horizonte mayor.

En particular, el diseño conceptual del modelo resuelve el problema previamente referido de pérdida sistemática de la información a lo largo de las etapas del ciclo de vida de los activos viales, que constituye un riesgo de magnitud empresarial para lograr los niveles de

servicio deseados y los beneficios económicos, sociales y de generación de valor; en tal sentido, al disponer de la documentación integral y absoluta de las instalaciones físicas en tiempo real mediante la tecnología Digital Twins se puede inferir que la gestión gerencial para todos los agentes o stakeholders dentro del modelo de negocio, en este caso de Participación Público Privada - PPP y específicamente en un esquema de Project Finance, se desarrolla de manera totalmente transparente en la medida que las decisiones corrientes de futuro inmediato e igualmente las estratégicas de más alcance temporal, junto con su comportamiento o líneas de acción sobre los activos viales son naturalmente observadas en el modelo digital. Y a su vez, estas determinaciones son perfectamente evaluadas de oportunamente en términos de materializar los objetivos de la propuesta de valor relacionada con la sostenibilidad integral de la infraestructura vial.

En tal sentido, la representación gráfica del diseño conceptual del modelo propuesto bajo la tecnología de Digital Twins tiene una geometría incremental de escalabilidad horizontal y vertical, en la medida que el sistema de información para la gestión gerencial y tecnológica de activos viales permite la virtualización de la infraestructura, en magnitud dentro de la línea de tiempo, a través de las etapas del ciclo de vida desde la planeación-estudios-diseños hasta el final de su operación/explotación y seguidamente el cierre definitivo/desmantelamiento; y de otro lado, posee la propiedad de ascender al nivel gerencial de toma de decisiones para situarse en un rango de inteligencia superior en el modelo de negocio, en este caso de Participación Público Privada - PPP. El gemelo digital se convierte en un sistema de gestión de información perteneciente a activos viales, con suficientes propiedades derivadas de la transformación digital que favorecen los procesos gerenciales de generación de valor.

A principios del siglo, en 2003, Digital Twins aparece formalmente en la industria de fabricación o manufactura (Iberdrola.com) y comprende la representación de un modelo virtual

de un sistema físico con la información de su estructura, componentes, comportamiento y demás datos de su naturaleza, en circunstancias de tiempo, modo y lugar; además de disponer de una comunicación bidireccional entre la realidad y la virtualidad.

De la revisión de la limitada literatura sobre la tecnología de gemelos digitales en el sector de infraestructura lineal, realizada por Broo y Shooling (2021), se puede inferir que aún no hay un concepto convergente acerca de su alcance y perspectivas; no obstante, si se observa una tendencia de valoración muy positiva y significativa en su proceso de maduración de acuerdo con el "Ciclo de sobreexpectación" de la empresa consultora Gartner Inc. (2018), es decir en el horizonte de corto plazo hay consenso y confianza sobre los efectos y beneficios derivados de esta transformación digital en la industria.

La presente investigación procura preferencialmente aportar al desarrollo del sector de carreteras mediante la presentación de un modelo conceptual para la gestión gerencial de activos de infraestructura vial (Road Asset Management), basado en la implementación de la tecnología de gemelos digitales de la industria 4.0 en desarrollo de las etapas del ciclo de vida de las instalaciones físicas. En tal sentido, desde el punto de vista de la disciplina de la Ingeniería de Consulta, la idea central consiste en plantear los componentes principales y sus relaciones del modelo de información para la gestión gerencial y tecnológica de activos viales, que propenda por facilitar los procesos de toma de decisiones de tal manera que el objetivo sea privilegiar la generación de valor desde el punto del beneficio social o interés colectivo.

En particular en el sector de infraestructura vial, se requiere ante todo precisar el alcance de la tecnología de gemelos digitales para su implementación dentro del entorno de las organizaciones y, en especial, su importancia en la incorporación a la gestión gerencial de la alta dirección.

El gemelo digital es un sistema compuesto por dos subsistemas idénticos que operan paralelamente en tiempo real en dos ambientes, uno físico y otro virtual. En efecto, el sistema posee la capacidad de emparejamiento entre los dos componentes indicados, mediante su identificación y reconocimiento, creando un enlace permanente o circuito de información en ambos sentidos entre los subsistemas, que emula el principio de la teoría física de acción y reacción, para determinar la dinámica continua del sistema Digital Twins en cuanto a los datos y a su estructura o estado.

El subsistema físico es el activo real y es el componente fundamental del gemelo digital; en ese mismo sentido, este activo se encuentra representado en toda su naturaleza, dimensión y contenido en un subsistema digital. En infraestructura vial, ese gemelo virtual puede estar representado por un modelo 3D obtenido del sistema de información geográfica - SIG y, en todo caso, será un replica de las instalaciones físicas en todo momento.

En su concepción tecnológica, genéricamente Digital Twins es un sistema de información soportado en recursos tecnológicos de la innovación digital propiciada por la industria 4.0, en toda su extensión. Sus componentes básicos comprenden las bases de datos, los algoritmos y software, los elementos de intercomunicación o interfaces, y los equipos o hardware de almacenamiento, procesamiento, y comunicación.

La información es capturada del mundo físico y por medio de una interfaz se presenta al usuario en un entorno cognitivo propio, a su turno los administradores o encargados de la operación del gemelo digital interactúan a través generalmente de recursos gráficos; y las facilidades ofrecidas a los usuarios reposan en un área específica con algoritmos y programas informáticos particulares para las operaciones de procesamiento y generación de resultados. Por supuesto, el sistema debe poseer la configuración física y de tecnológica adecuada para manejar volúmenes importantes de datos a altas velocidades con tiempos óptimos de respuesta,

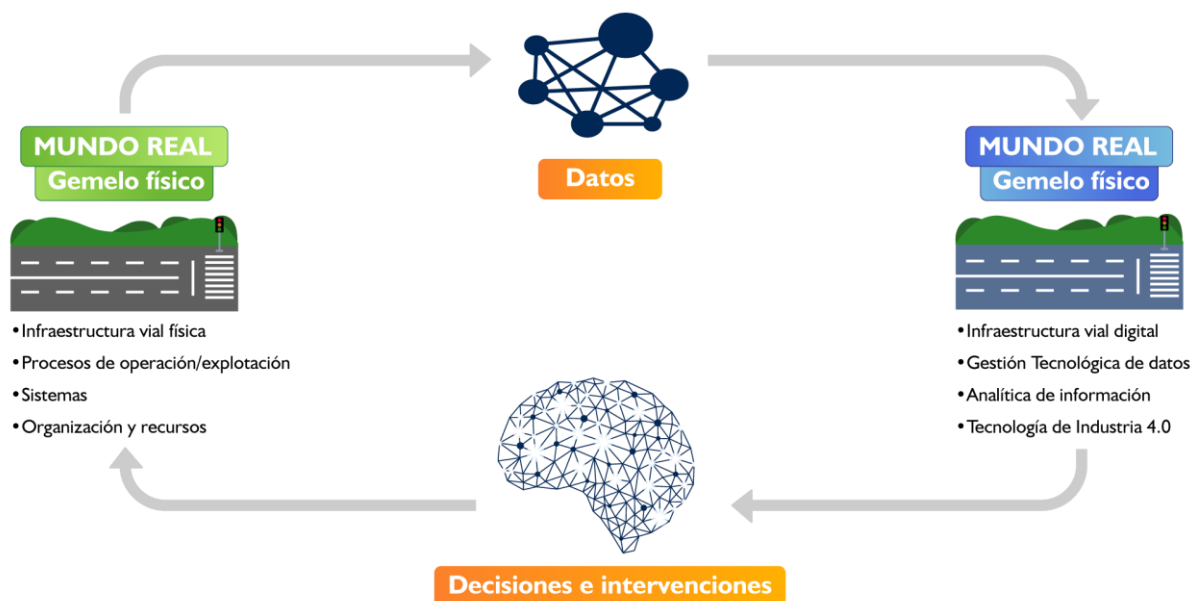
y requiere de utilidades informáticas para facilitar las decisiones de alto nivel en la gestión gerencial de activos.

El gemelo digital se concibe como una representación virtual de un activo físico, en todas sus expresiones, con una interacción especial por medio de su conexión entre el subsistema real y el subsistema digital, que hace diferencia con cualquier otro modelo, en virtud de que posibilita la operación en tiempo real. Para establecer esta propiedad de interconexión, Digital Twins comprende una red de relaciones entre sus bases de datos que permite integrar y consolidar el sistema total.

Este proceso a su vez faculta al subsistema virtual para interactuar con el subsistema físico, de tal manera que se cierre el circuito de información generando un enlace permanente en ambas direcciones. En todo caso, las decisiones o actuaciones que impliquen modificaciones sobre las instalaciones físicas pueden ser tomadas de forma automatizada mediante aplicaciones de inteligencia artificial o directamente por medio de un agente o stakeholder encargado de la gestión de activos. (Broo y Schooling, 2021).

Así mismo, el sistema en su conjunto es dinámico pues tiene la propiedad de permanecer actualizado en la medida que el subsistema físico presenta novedades derivadas de acciones propias o internas, generalmente ordenadas y/o autorizadas por el agente responsable de la gestión de activos, o por cambios originados en externalidades que afectan el ecosistema; en ambos casos, las modificaciones son transmitidas en tiempo real al subsistema virtual para su correspondiente actualización (Tchana et al., 2019).

Para recrear los componentes estructurales de un modelo Digital Twins, sus relaciones y propiedades, se presenta la **Figura 19**

Figura 19*Estructura de un modelo de Digital Twins*

Nota. La figura muestra los componentes estructurales de un modelo Digital Twins, sus relaciones y propiedades. Fuente: elaboración propia.

El modelo propuesto tiene por objeto integrar la tecnología Digital Twins y los productos de la transformación digital de la industria 4.0, a la gestión gerencial de activos de infraestructura vial, para facilitar los procesos de toma de decisiones a nivel estratégico con el propósito de maximizar la generación de valor económico y social de las instalaciones físicas, creando un cambio organizacional que privilegia a la población de usuarios al proporcionar una 'mejor experiencia del cliente' en la prestación de los servicios. El desarrollo del diseño conceptual, se enmarca dentro del modelo de negocio de participación público privada -PPA- para el sector de infraestructura vial, bajo la esquema particular de Project Finance, que permite la financiación del activo fijo de vida económica extensa mediante sus flujos de caja futuros en la etapa de explotación, y cuya estructura y dinámica empresarial está basada en el análisis de los riesgos asociados con la realización del proyecto y con la operación propia del activo.

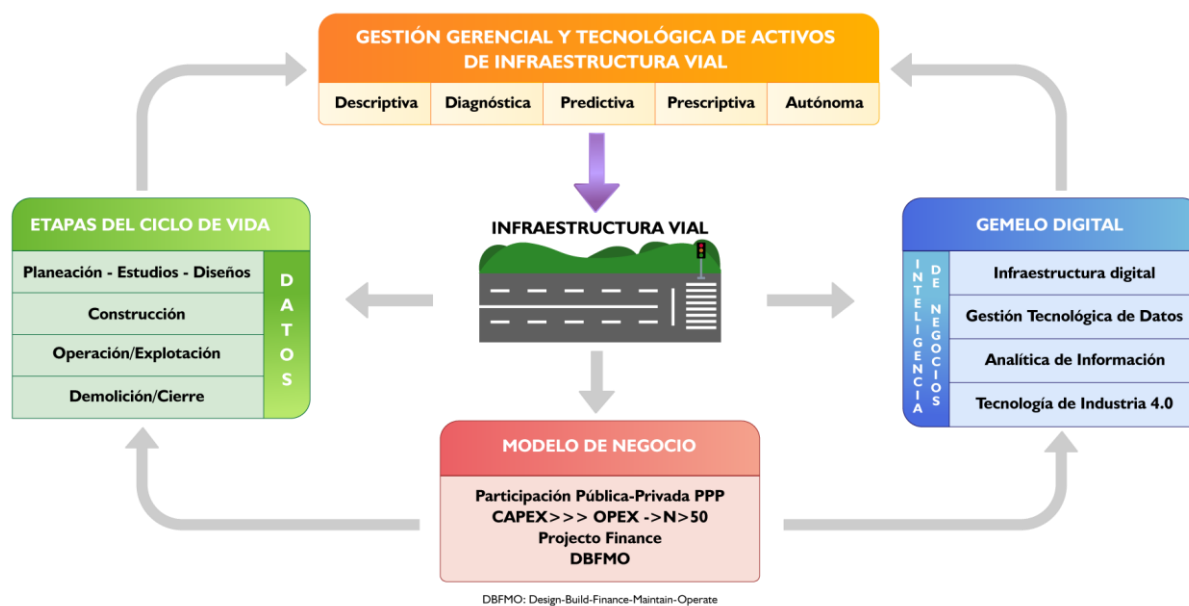
De manera específica se puede afirmar que la información constituye el recurso esencial en la gestión de activos viales, con especial ponderación en el modelo de PPA basado en el enfoque Project Finance, por razones de la propia configuración del negocio en cuanto a la amplia participación de actores/stakeholders y al horizonte extenso de vida económica de la infraestructura, que a su vez requiere de una administración de riesgos estructurales de la PPA de mayor exigencia y oportunidad en materia de información sobre la gestión de los activos viales.

Ante estas condiciones, la incorporación de la tecnología Digital Twins permite satisfacer los requerimientos indicados previamente para lograr un nivel de gobernanza de la información que facilite los procesos gerenciales de toma de decisiones. En consecuencia, al integrar el gemelo digital a la gestión de activos viales en un entorno de PPA se responde objetivamente a efectuar una eficiente administración de riesgos para las partes intervinientes en esta modalidad negocio; en todo caso, se busca prevenir las conductas impropias de posición dominante de los agentes que puedan afectar la generación de valor de los activos viales.

El modelo conceptual diseñado comprende los componentes de Digital Twins, los procesos estratégicos para la toma de decisiones, y su integración en el ambiente de la gestión gerencial de activos viales. En este orden de ideas, el sistema total está compuesto de dos subsistemas, uno físico o real y otro digital, que se identifican y reconocen con la misma ‘data’ mediante un ciclo continuo de transferencia en tiempo real, al emular las actividades propias de la gestión gerencial de la infraestructura. En particular, el modelo conceptual representa la práctica empresarial del agente operador del activo vial con la implementación de la tecnología del gemelo digital. La **Figura 20** ilustra el sistema propuesto a nivel conceptual.

Figura 20

Diseño Conceptual de la Gestión Gerencial y Tecnológica de Activos Viales



Nota. La figura ilustra el sistema propuesto a nivel conceptual. Fuente: elaboración propia.

El gemelo digital debe permanecer actualizado al disponer de la versión en tiempo real de las instalaciones físicas, de tal forma que la información de todo el ciclo de vida del activo -tanto de estado como de comportamiento- sirva de referencia absoluta para los procesos gerenciales de decisiones estratégicas.

Los subsistemas físico y digital, además de su capacidad de sincronización, deben estar conectados con aplicaciones que facilitan la presentación de bases de datos estructuradas para favorecer los procesos de análisis y su uso en algoritmos de inteligencia artificial orientados a tomar decisiones estratégicas -tanto autónomas como controladas/intervenidas- en la gestión de activos viales. Como quiera que estas actividades se sumergen en la tecnología, como recurso fundamental a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura, es importante promover un desarrollo institucional en este sector para que las organizaciones y/o agentes stakeholders

avancen hacia la transformación digital y propicien el fortalecimiento de la gestión gerencial y tecnológica en beneficio de la generación de valor económico y social de industria.

En desarrollo de la metodología de investigación de ciencias del diseño -DSR- es preciso adelantar la evaluación del artefacto, representado en el modelo de gestión gerencial de activos viales, mediante la aplicación de uno de los métodos presentados previamente en el capítulo 3, numeral 3.3, tabla 2. Con tal propósito, dado el tipo de artefacto, se ha seleccionado el método descriptivo para su validación, partiendo de la evidente importancia del modelo conceptual al incorporar los avances tecnológicos de Digital Twins a la gestión de la infraestructura vial, para facilitar la toma de decisiones totalmente informadas en la etapa de operación/explotación, dentro del marco de los objetivos de desarrollo sostenible - ODS (2015) establecidos por las Naciones Unidas, que propenden en general por un mejor futuro a nivel global.

El modelo de gestión gerencial es un artefacto que ofrece una oportunidad para gestionar activos viales aprovechando las nuevas tecnologías y la transformación digital en este sector, creando procesos y sistemas de información con “data” de calidad, confiable y de total cobertura que interactúan con los productos de inteligencia artificial y de la industria 4.0, en entornos predictivos y prescriptivos, y así lograr mayor generación de valor de los activos. Si bien con la monitorización de la infraestructura se obtiene la información acerca de su estado y comportamiento, la analítica generada con los algoritmos de simulación avanzados permite optimizar su operación y prestación del servicio.

Con Digital Twins las decisiones gerenciales son más inteligentes, toda vez que están orientadas a mejorar continuamente los niveles de eficiencia en las distintas etapas del ciclo de vida de las instalaciones físicas; particularmente en la operación/explotación se pueden

identificar ineficiencias, reducir costos, programar actividades de mantenimiento, y formular soluciones que apoyan la gestión gerencial.

Las facilidades de sensorización hacen posible la sincronización del mundo físico y el mundo virtual, para alimentar la plataforma de analítica de datos y entregar soluciones en tiempo real. Así las cosas, y en consideración a las experiencias y resultados exitosos en otras industrias, las utilidades de la integración de la transformación tecnológica a la gestión de activos en el sector de infraestructura vial conducen a determinar su factibilidad y evidenciar escenarios muy propicios para su desarrollo y aplicación, con notables impactos de orden social, económico y de sostenibilidad integral.

3.5. Esquema de Términos de Referencia para Ingeniería Básica del Modelo de Gestión de Activos

En las etapas de ‘planeación- estudios - diseños’ y de ‘construcción’ el gemelo digital representa un proyecto de activo hasta su entrega, y en el periodo de operación/explotación se convierte en un activo en funcionamiento o en servicio; en ambos estados durante el ciclo de vida, es fundamental que todas las partes interesadas/stakeholders dispongan de la misma información, en términos de cantidad y calidad, para que la gestión de activos este basada en decisiones informadas y con observancia a la mejor atención de los riesgos del modelo de negocio de participación público-privada PPP. En estas circunstancias, la tecnología Digital Twins con ‘data’ en tiempo real propende por la mayor generación de valor de la infraestructura en el horizonte de vida económica.

Al efecto, es de suma importancia que el diseño del modelo de gestión evolucione progresivamente en su nivel de contenido y capacidad funcional, desde la dimensión conceptual para seguir con la ingeniería básica y terminar con el diseño detallado, como se ilustra a continuación en la **Figura 21**.

Figura 21*Evolución del Modelo de Gestión de Activos durante el Ciclo de Vida*

| ETAPAS DEL CICLO DE VIDA | | | | |
|--|--|----------------------------------|---|--|
| A C T I V O | Planeación Estudios Diseños | Construcción | Operación/ Explotación | Desmantelamiento/ Cierre |
| G E S T I O N | Modelo Conceptual Ingeniería Básica Diseño Detallado | Procesos Cronogramas CAPEX | Operaciones/Servicio Mantenimiento OPEX | Inventario Entrega/Demolición Evaluación Ex-post |

Nota. Elaboración propia.

Los gemelos digitales recrean las operaciones de un objeto, proceso o sistema, a través de un modelo virtual que permite la integración con algoritmos de inteligencia artificial y demás utilidades de la industria 4.0, en un ambiente colaborativo de “cloud computing”, entregando un ecosistema con importantes facilidades para la gestión gerencial de activos. La evidencia del potencial de la tecnología Digital Twins en los procesos de toma de decisiones se deriva de sus aplicaciones exitosas en las industrias automotriz, aeroespacial, de manufactura y automatización de productos, e igualmente de construcciones de edificaciones o infraestructura vertical. En esa dirección, la propuesta de un esquema de términos de referencia para el diseño de ingeniería básica -a partir del modelo de ingeniería conceptual de la presente investigación- de un “modelo de gestión de activos viales soportado en gemelos digitales”, debe apuntar de primera mano a capitalizar esas experiencias acertadas en otros sectores.

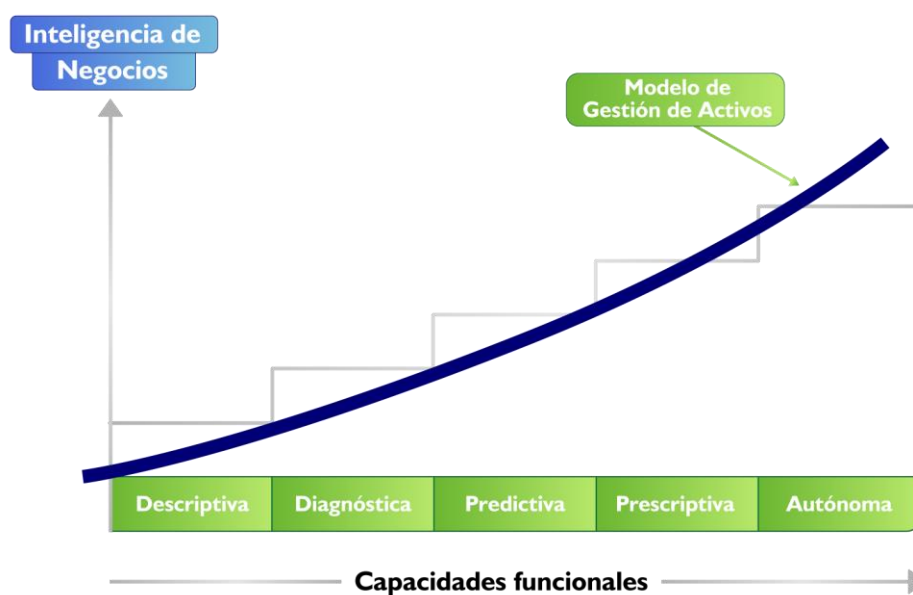
En consecuencia, desde el ámbito de la Ingeniería de Consulta, se plantea abordar un enfoque de diseño incremental para el modelo básico de gestión de activos viales, como un

artefacto o producto desarrollado con base en el diseño conceptual y, en todo caso, observando un mayor alcance de la integración de la tecnología de Digital Twins. En esa línea, el Instituto de Gestión de Activos (IAM, 2015), hace énfasis en la importancia fundamental de los datos de las instalaciones físicas con el objeto de generar “buena” información que permita crear soluciones efectivas en su gestión, al disipar los riesgos de gobernanza de datos y afirmar la confianza en los niveles gerenciales. Para el efecto, los términos de referencia deben solicitar que el modelo de ingeniería básica soportado en Digital Twins ofrezca los procesos informáticos y tecnológicos que respaldan la gestión de activos en el horizonte de vida económica y la obtención de mayor valor económico, social y de sostenibilidad integral de la infraestructura.

Alineando la gestión de activos viales, en su esencia de tomar decisiones basadas en datos, con las acciones propias instrumentalizadas en el gemelo digital para la adopción de capacidades de inteligencia de negocios, que posibilitan transitar por el portafolio de funcionalidades de la gestión de activos -descriptiva, diagnóstica, predictiva, prescriptiva y autónoma-, se advierte que avanzar en el diseño desde su magnitud conceptual a la ingeniería básica supone que la guía de requerimientos se focalice en el desarrollo de este enfoque incremental. De manera particular, el esquema de términos de condiciones explícitamente debe requerir la precisión del alcance de cada funcionalidad, para presentar una arquitectura básica del modelo de gestión de activos de infraestructura vial con un nivel tecnológico y organizacional viable para el modelo de negocio de participación pública-privada.

Figura 22

Enfoque Incremental de las Funcionalidades del Modelo de Gestión de Activos



Nota. Elaboración propia.

Las funcionalidades de la gestión gerencial escalan en su capacidad de inteligencia en la medida que se agregan utilidades de la ciencia de datos, instaladas por los algoritmos de inteligencia artificial y las facilidades de la industria 4.0; partiendo desde la función ‘descriptiva’ que comprende el análisis estadístico y la representación sistemática de la información para observar y comprender el comportamiento operacional del activo. En el siguiente nivel de ‘diagnóstico’ se hace precisión sobre el estado y funcionamiento de la infraestructura, con la aplicación de técnicas multivariantes y probabilísticas, para continuar con la fase ‘predictiva’ sobre la conducta futura y de control del activo. La máxima facultad de inteligencia está asociada con las funcionalidades de ‘prescripción’ y de ‘autonomía’ que se logra con la simulación de escenarios y los análisis correspondientes de optimización de la solución, y finalmente con la capacidad de aprender y actuar sin intervención directa de los tomadores de decisiones de la alta dirección, sino como sistema inteligente o experto en la gestión de activos viales.

De otro lado, con la absoluta importancia que me merece el tema dentro del esquema de términos de referencia del diseño básico, es infalible solicitar a nivel de la organización del modelo de negocio de participación público-privada PPP las estrategias de identificación cultural y tecnológica con el objeto de alinear a todos los agentes/stakeholders para explotar las capacidades indicadas de Digital Twins.

3.6. Evaluación del Modelo Conceptual de Gestión

El diseño a nivel conceptual corresponde a un modelo de información para la gestión de activos de infraestructura vial y en tal sentido la investigación plantea dos patrones de pensamiento, por un lado, se alinea con las teorías del comportamiento organizacional y, de otra parte, la metodología de la ciencia del diseño posibilita la construcción de un artefacto para solucionar un problema específico del modelo de negocio. Así las cosas, la solución plantea la conjunción del talento humano y los procesos de la organización, con la integración de la tecnología Digital Twins, para recrear un sistema interdisciplinar de información de gestión gerencial de infraestructura inteligente.

El objetivo de la investigación bajo la metodología Design Science Research - DSR permite describir el modelo de información dentro de un dominio conceptual para comprender el problema, formular la solución y evaluar sus bondades que justifiquen su desarrollo y conveniencia de implementación. En este ordenamiento, se requiere evidenciar que el contenido estructural, la calidad y la efectividad del artefacto hacen absoluto sentido en el contexto empresarial referido; por lo tanto, la evaluación constituye un elemento principal de la investigación. (Reyes, K., Aquino, J., 2022)

Con este propósito, es infalible considerar el estado de desarrollo del modelo, la arquitectura básica de la tecnología Digital Twins y el ecosistema de negocio de participación público-privada, para establecer el tipo de evaluación del artefacto y precisar el alcance de este

proceso. En esa dirección, el nivel conceptual del modelo es determinante en la naturaleza de la validación, toda vez que esta primera fase en el desarrollo del diseño de ingeniería no permite acudir a métodos directos de verificación cuantitativos y, en consecuencia, la metodología de investigación DSR establece la aplicación de la “evaluación descriptiva”, para argumentar la relevancia y los beneficios del modelo de gestión de activos viales, y así valorar y ponderar su validez y confiabilidad; este tipo de evaluación es generalmente utilizada en ciencias de la información, sistemas gerenciales, investigación social y en el diseño de ingeniería. En particular, los artefactos de tecnología de la información (TI) con un grado de diseño conceptual pueden ser evaluados en relación con su funcionalidad, integridad, consistencia, fiabilidad, identidad con el modelo de negocio y otras propiedades de calidad notables. (Hevner et al., 2004).

En estas circunstancias, el modelo propuesto ha sido evaluado al verificar su consistencia con el marco teórico y los principios prácticos de la metodología DSR, en términos del cumplimiento con los elementos requeridos de la investigación de ciencias del diseño; de igual forma, el modelo de gestión gerencial proporciona un proceso formal para adelantar la investigación con un enfoque centrado en la problemática identificada en el sector de infraestructura vial, que permite inferir la funcionalidad y efectividad de la solución. De otra parte, el modelo conceptual se concibe como la optimización del sistema de decisiones en escenarios de la alta dirección, en la etapa de operación/explotación del ciclo de vida de los activos, con una perspectiva para introducir mayores especificaciones técnicas en la medida que se avanza en el diseño de ingeniería básica y de ingeniería de detalle del modelo, y naturalmente pasar de una forma descriptiva de evaluación a métodos cuantitativos de experimentación técnica.

Este tipo de argumentación acerca de la validez del artefacto admite presentar casos de éxito de modelos de gestión de activos de infraestructura vertical, particularmente de edificaciones, para establecer una relación homóloga -más que análoga- con la industria de infraestructura lineal y permitir una mayor comprensión y evidencia en la evaluación. En general, la transformación digital y la implementación de tecnologías en el sector de la construcción generan importantes beneficios en la gestión de las instalaciones; en especial los gemelos digitales, facilitan la captura y monitoreo de datos en tiempo real, la obtención continua de información, la toma de decisiones objetivas basada en datos y soportan los procesos de la gestión predictiva y prescriptiva de las edificaciones.

La literatura ofrece interesantes casos de investigación experimental para observar los beneficios y precisar los desafíos de la aplicación de gemelos digitales en la etapa de uso o prestación de servicios de las construcciones. No obstante, la creciente preferencia del tema de Digital Twins en la academia, su adopción en la industria de la construcción aún alcanza niveles de penetración discretos en la gestión de activos durante su operación/explotación. Al respecto, los resultados observados de una revisión de la literatura muestran que los retos más apremiantes se relacionan con los cambios en la cultura organizacional y la necesidad de una normativa tecnológica sólida, estándar y global que facilite su desarrollo e implementación. (Venable et al., 2014)

El modelo conceptual obtenido es el resultado de un proceso creativo sobre la metodología DSR de resolución de un problema de gestión gerencial de activos viales, alrededor de un riesgo empresarial de gobernanza de información que puede materializarse en contingencias de “abuso de posición dominante” en el modelo de negocio de PPP -con enfoque Project Finance- en esta industria. A su turno, constituye la primera fase de desarrollo del artefacto desde el punto de vista del diseño de ingeniería; es decir, el modelo proporciona toda

la información requerida para continuar con el diseño básico y pasar a la ingeniería de detalle. En consecuencia, en este estado no es necesario que el modelo este absolutamente terminado pues hace parte del proceso secuencial del diseño de ingeniería; pero, sin duda, su estructura, componentes, relaciones y funciones, son naturalmente relevantes y aseguran la representación y comportamiento del ecosistema real.

En estas circunstancias, siguiendo la metodología DSR, se ha optado por la “evaluación descriptiva” como tipo de validación y valoración del modelo conceptual, y con este propósito se hace una descripción cualitativa y comparativa del sistema físico o real y el sistema virtual modelado, presentando un esquema semántico de las especificaciones y las interacciones de sus partes estructurales como mecanismo de interpretación del mundo real; igualmente, permite proporcionar la retroalimentación requerida para la siguiente fase de desarrollo del modelo y asegurar el rigor en el diseño de ingeniería. Además, de acuerdo Hevner et al. [2004], en esta investigación la evaluación también comprende la respuesta a dos preguntas fundamentales: "¿Qué utilidad proporciona el nuevo artefacto?" y "¿Qué demuestra esa utilidad?"; con el primer interrogante se precisa acerca de la relevancia de la problemática identificada en la gestión de activos viales, y contestando la siguiente interpelación se determina la idoneidad y el rigor de la solución propuesta; en consecuencia, teniendo presente esos dos dictámenes se ha verificado la practicidad y utilidad del artefacto diseñado. A este respecto, en el proceso de evaluación descriptiva también se ha acudido a la base de conocimiento de la tecnología de Digital Twins aplicada a la gestión de infraestructura vertical, particularmente en las etapas de diseño y de construcción, para revisar la literatura y citar como referencia bibliográfica los artículos de investigación más pertinentes a fin de demostrar de manera axiológica la funcionalidad, factibilidad, conveniencia y beneficios del modelo conceptual.(Adekunle, et al., 2021) (Pokolenko, et al., 2022).

3.7. Casos de Éxito

En desarrollo de la evaluación del modelo conceptual de información bajo la tecnología de Digital Twins para la gestión de la infraestructura vial, se ha consultado la literatura acerca de los casos de éxito que verifican el cumplimiento de las especificaciones y requisitos, la lógica, la funcionalidad y la estructura del modelo; e igualmente, se valida su coherencia y representación de la realidad, tanto en términos discretos o de resultados como continuos de comportamiento.

Los siguientes tres casos en diferentes industrias ilustran la utilización de gemelos digitales con el objetivo particular de monitorear, supervisar y controlar operaciones, planificar y programar actividades de mantenimiento preventivo, administrar el ciclo de vida del servicio y mejorar su prestación al público.

En primer lugar (Thor Olavsrud, 2022), la empresa multinacional británica Rolls-Royce establecida en 1904 que diseña, produce y distribuye sistemas de energía para la aviación y otras industrias, ha implementado la tecnología Digital Twins para virtualizar en tiempo real cada motor entregado a sus clientes, con el propósito de hacer seguimiento detallado de su estado, operación y comportamiento, y optimizar su vida económica. Los resultados se han traducido en mejoras en el diseño de los productos, permanente interacción con el cliente para una experiencia colaborativa y memorable en la utilización de los sistemas de energía, reducción de los costos de mantenimiento por extensión del periodo de reparación y/o reposición de sus partes, además de lograr mayor eficiencia de los motores y disminuir notablemente los efectos sobre el cambio climático.

En segunda instancia (Thor Olavsrud, 2022), Bayer es una compañía global de investigación con enfoque en las “ciencias de la vida”, en particular salud y agricultura, que está en primer lugar en tecnología e innovación para el desarrollo de productos y soluciones

que ofrecen bienestar y mejor nivel de vida a la población alrededor del mundo. La estrategia de la división Bayer Crop Science consistente en “fábricas virtuales”, aprovecha la tecnología de Digital Twins al crear una representación digital dinámica para cada uno de los nueve centros de producción de semillas de maíz, que están ubicados en América del Norte. El modelo virtual comprende los equipos, los procesos, los materiales, las políticas y normas de fabricación, y los productos; permitiendo realizar simulaciones de las operaciones para tomar decisiones estratégicas sobre sus actividades empresariales.

Las semillas se recogen en los amplios campos de Bayer y luego pasan a las fábricas donde se procesan y empaacan, y posteriormente se distribuyen a los agricultores. En la medida que la multinacional presenta nuevas ofertas comerciales de semillas, la dirección de la empresa utiliza las fábricas virtuales para transformar sus procesos operacionales a estas estrategias de mercado. En ese mismo sentido, la tecnología digital también puede facilitar la toma de decisiones de inversiones de capital, formular y evaluar planes comerciales, optimizar flujos de producción y analizar capacidad de los equipos, entre otras utilidades.

De este caso de estudio, se plantea una clave de éxito que radica en el “conocimiento del dominio del negocio” por parte del talento humano encargado del equipo de ‘Ciencia de Decisiones’ de Bayer, para crear un lenguaje de liderazgo que supera y soporta los procesos de aprendizaje automático.

El tercer análisis de caso corresponde a un proyecto emblemático de desarrollo e implementación de la tecnología Digital Twin, identificado en la literatura como “Singapur Virtual”, que comprende la representación dinámica en 3D de la ciudad insular en una plataforma de datos totalmente colaborativa para todos los agentes o partes interesadas (Govtech Singapur, 2017). Este proyecto ha sido coordinado entre por la Fundación Nacional

de Investigación - NRF sigla en inglés, la Autoridad de Tierras de Singapur - SLA iniciales en inglés, y la Agencia de Tecnología del Gobierno de Singapur - institución GovTech.

La ciudad digital es maravillosamente navegable, con un diseño de software multidimensional de la empresa francesa Dassault Systèmes, en colaboración con la NRF, para administrar las bases de datos de la información geográfica proporcionada por la SLA, y la información y soluciones digitales de la Agencia de Tecnología del Gobierno de Singapur. Con este ecosistema de gemelo digital se ofrece a los diferentes usuarios de todos los sectores disponer de modelos de simulación para tomar decisiones absolutamente informadas acerca de las operaciones logísticas requeridas con el objeto de optimizar los servicios de infraestructura de la ciudad; al mismo tiempo, la naturaleza propiamente colaborativa del proyecto permite desarrollar aplicaciones avanzadas de planificación de la urbe y la integración escalable de nuevas tecnologías.

De acuerdo con la descripción del sistema de Government of Singapur (2021), el modelo Digital Twin comprende información de texto y gráfica de todos los componentes físicos de la gran ciudad, como, por ejemplo: “representación de objetos geométricos, atributos del terreno, cuerpos de agua, vegetación, infraestructura de transporte, etc”. En suma, la metrópoli de Singapur es representada virtualmente y sus instalaciones reales pueden ser detalladas en los elementos más específicos; y también, sus habitantes son un componente más que hace parte del sistema. De la misma forma, es posible conocer otras variables ambientales como temperatura, presión, humedad, luminosidad, ruido, etc.

Como quiera que el “mundo real” de Singapur está contenido en el gemelo digital, se puede concluir que se dispone de un entorno de datos para administrar convenientemente la ciudad en toda su extensión y dinámica social, económica y ambiental; a la vez, que permitirá una apropiada gestión pública con beneficios evidentes para su población en general.

4. Conclusiones

4.1. La importancia de la Gobernanza de Datos

En toda su extensión, se puede afirmar que los datos representan un recurso fundamental en el mundo empresarial. Entonces las actividades de recopilar, analizar, usufructuar los datos y convertirlos en información para tomar decisiones fundamentadas y objetivas constituye, sin duda, un proceso de éxito en los negocios. Esta especial circunstancia, está acompañada de una tarea esencial relacionada con la gobernanza de datos y de información.

En esta materia, la gobernanza comprende las actividades, procesos y políticas que tienen por objeto gestionar la información. Para el efecto, la organización debe determinar el talento humano, los procesos y la tecnología con el fin de asegurar que los datos sean confiables, transparentes y con integridad, al tiempo que su utilización permita generar la información objetiva, apropiada y pertinente para la empresa, de manera que pretenda administrar acertadamente los riesgos, consolidar el valor estratégico de los datos y facilitar el proceso de toma de decisiones.

Los riesgos originados por la carencia o falencias de la gobernanza de “data” comprometen seriamente las organizaciones, por la exposición a contingencias de seguridad de la información, de incumplimientos normativos o de regulación sobre protección y privacidad de datos, y, por último -pero más importante- la falta de datos confiables, objetivos y representativos. En particular, la “data” incompleta y/o defectuosa puede generar decisiones desacertadas con implicaciones negativas para los negocios, que se traducen en pérdida de ingresos y resultados desfavorables de las operaciones, además de la posible materialización de riesgos de reconocimiento empresarial y de orden legal.

En este contexto, emerge el concepto de ‘gobernanza de la información’ -como la gestión de tomar y hacer cumplir las decisiones- que involucra al talento humano, los procesos y la tecnología, con el propósito de mitigar riesgos en la gestión empresarial y lograr los objetivos misionales y estratégicos de la organización. En ese sentido, se privilegia la identidad, confiabilidad, integridad, protección y uso de la información para todos los agentes/stakeholders.

Con la transformación tecnológica de la industria 4.0, en particular con los algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial, se capturan y procesan cantidades considerables de datos que producen la información relevante para la toma de decisiones y actuar en los escenarios de predicción y prescripción de la gestión de activos. Sin duda, es el universo de la ‘data’, y en consecuencia las decisiones inteligentes demandan datos confiables y objetivos en todo sentido, sin importar la providencia del algoritmo.

4.2. Aporte al Conocimiento

En el caso particular de la infraestructura vial, la problemática actual del riesgo de pérdida sistemática del valor de la información a lo largo del ciclo de vida del activo se origina por las falencias en la gobernanza de los datos, al transitar por las diferentes etapas del horizonte económico (desde la planeación-estudios y diseños, pasando por la construcción y en la operación/explotación de las instalaciones) con la participación de diversos actores/agentes que ponderan subjetivamente sus posiciones; además de un elemento connatural en los modelos de negocio PPP con enfoque Project Finance, consistente en el extenso plazo contractual de los contratos de la alianza público-privada que exige un conocimiento riguroso, continuo y agregado de las actividades. Estas circunstancias, caracterizan la situación del modelo empresarial que dificulta la gestión gerencial de los activos viales.

La convergencia del mundo físico y el virtual, al alinear la tecnología Digital Twins a la gestión gerencial de activos viales, induce a las partes interesadas/stakeholders a establecer un ambiente colaborativo en todo el ciclo de vida de la infraestructura para la generación y administración de la información, facilitando la creación de conocimiento y su aplicación en los procesos gerenciales.

La literatura es propensa a impulsar la implementación de Digital Twins en los sectores industriales de manufactura -automotriz, aeroespacial, metalmecánico-, medicina y de construcción vertical. Con esta investigación se aborda una actividad industrial con requerimientos importantes en materia de transformación digital para su desarrollo empresarial y contribución a la economía en general; al efecto, el alcance resultante a nivel de diseño conceptual comprende la incorporación de la tecnología de gemelos digitales en el sector de infraestructura vial, particularmente en las actividades de concepción del sistema, captura de datos, almacenamiento y análisis de información, integración e interoperatividad con algoritmos de la industria 4.0, toma de decisiones autónomas y/o controladas/ intervenidas, validación y retroalimentación de estrategias de negocios; y así, emular de manera virtual las funciones propias de la gestión gerencial y tecnológica de activos.

El diseño del modelo autónomo de gestión de activos, está integrado por tres componentes, en primer lugar por los dispositivos que capturan y transmiten los datos del mundo físico de la infraestructura para alimentar las bases de datos del sistema, en segundo término por los algoritmos de inteligencia artificial que procesan la información y producen los resultados para su conversión en decisiones, y finalmente por la interfaz de circuito cerrado que permite interactuar entre los subsistemas virtual y físico. La interfaz se encarga de transmitir las decisiones en sentido ‘digital a real’ y actualizar la información sobre el estado y

evolución del activo. A renglón seguido, de forma circular, se vuelve a capturar los datos físicos y se actualiza el gemelo digital, para continuar con el proceso automatizado del modelo.

El modelo conceptual presentado incorpora la capacidad tecnológica de Digital Twins a la gestión gerencial de activos de infraestructura vial, para modelar una solución empresarial que propenda por optimizar los procesos de toma de decisiones estratégicas, mediante la transformación digital como respuesta a los riesgos de gobernanza de la información a lo largo del ciclo de vida de los activos viales, en los modelos de negocio de participación público-privada PPP y en la modalidad de Project Finance; en tal sentido, se propone esta integración tecnológica para maximizar la generación de valor de las instalaciones, en términos económicos, sociales y de desarrollo sostenible.

De las experiencias exitosas de la gestión de activos con Digital Twins en distintos sectores económicos, se puede inferir que su implementación en la industria de la infraestructura vial propende por optimizar los resultados de la etapa de operación/ explotación de los activos, con el objeto de proporcionar mejores servicios a la sociedad en términos de funcionalidad, seguridad y sostenibilidad, y en general elevar el nivel de vida de la población.

Además, el diseño conceptual propuesto proporciona una base de conocimiento para adelantar la Ingeniería Básica del modelo de gestión gerencial y tecnológica de activos viales, que finalmente permita avanzar en la senda del paradigma de “Smart Roads”, mediante la integración de la tecnología de gemelos digitales y las innovaciones de inteligencia artificial de la industria 4.0 al sector económico de infraestructura vial.

En consecuencia, se puede expresar que la presente investigación sobre la gestión gerencial de activos viales con la incorporación de la tecnología Digital Twins puede aportar un conocimiento valioso para el desarrollo y la innovación del sector infraestructura vial, con el objetivo final de contribuir a mejorar las condiciones de bienestar de la sociedad.

4.2.1. Aporte al Conocimiento

El sector de la infraestructura ha sido notoriamente poco diligente en responder oportunamente a la apropiación de la tecnología digital, con severas consecuencias al mantener el “status quo” en los niveles de eficiencia operacional de los procesos y flujos de trabajo, en la problemática inherente de frecuentes sobrecostos e incumplimientos en los cronogramas, y en general la atención de todos los riesgos asociados con las actividades de la industria.

En estas circunstancias, la transformación digital hacia la Industria 4.0 ofrece amplias perspectivas para resolver positivamente las limitaciones y dificultades del sector, a través de la integración de nuevas tecnologías y con una metodología de naturaleza colaborativa entre todos los actores o partes interesadas, como solución a la problemática identificada de pérdida sistemática del valor de la información -en cantidad y calidad- en el curso del ciclo de vida de la infraestructura, reduciendo sensiblemente las brechas de información y actuando oficiosamente ante el riesgo de “data governance“. Esta investigación precisamente tiene como objetivo construir un modelo conceptual de gestión de información de activos viales, con la integración de la tecnología de gemelos digitales y las innovaciones digitales de la industria 4.0, en todo el horizonte de vida económica de las instalaciones físicas, con especial énfasis en la etapa de operación/explotación.

El acervo bibliográfico es generoso en subrayar la relevancia del poder transformador de la tecnología Digital Twins, para fomentar la innovación en las etapas de “planeación-estudios-diseños” y de “construcción”, bajo criterios de resiliencia y sostenibilidad integral. Los casos de estudio de aplicación de la tecnología de gemelos digitales en la gestión de las instalaciones físicas expresan sin objeción alguna la capacidad para coordinar y facilitar la interoperatividad de datos entre los distintos agentes o partes interesadas. Los encargados de la

gestión de la infraestructura, operadores y/o propietarios, reconocen cada vez más el valor de Digital Twins en diferentes contextos, lo que impulsa a extender la digitalización y virtualización a la etapa de servicio de los activos, más allá del diseño y la construcción.

El mundo virtual es fundamental para optimizar los procesos de toma de decisiones de la alta dirección y armonizar las operaciones de los activos con las prestaciones de los servicios de infraestructura a la población, como un gran aporte al conocimiento de la gestión gerencial de activos. En particular, la integración de la tecnología de gemelos digitales desde el inicio de un proyecto y su aplicación en todo el ciclo de vida económica, incluyendo la etapa de operación/explotación, mejora la calidad de los activos y contribuye a la sostenibilidad social de los servicios. En esa línea, la convergencia interdisciplinaria de la ingeniería, la gestión gerencial y las ciencias de información, en el modelo conceptual de gestión de activos, permiten trascender la línea base del conocimiento hacia un importante viaje de transformación tecnológica de este sector de la economía.

4.2.2. Aporte a la Gestión Tecnológica

Para las economías de los países en desarrollo, una oportunidad de avanzar hacia el progreso de su población radica en la transformación digital. Esta nueva era incorpora las innovaciones de la tecnología digital, el talento humano y los procesos empresariales a la dinámica organizacional para crear las capacidades requeridas en un entorno de constante cambio. A nivel global, la transformación debe ser orientada conjuntamente entre los sectores privado y público, con la participación y articulación de todos los actores interesados en alcanzar un mayor desarrollo económico, social y de sostenibilidad integral en los territorios.

Con este marco de referencia, el ecosistema digital requiere de políticas y acciones dirigidas a promover el aumento de la inversión en infraestructura digital, el diseño de marcos

normativos adecuados para estimular la transformación digital, el desarrollo de talento humano, el aprovechamiento de tecnologías disruptivas, y el respaldo a nuevos modelos de negocio. Asimismo, la transformación digital tiene el potencial de mejorar la calidad en la provisión de infraestructura de servicios públicos, con el consiguiente impacto en la calidad de vida y en la inclusión social.

La tecnología de Digital Twins ha revolucionado las etapas del ciclo de vida de las infraestructuras, con efectos positivos sobre la forma en que se diseñan, construyen y gestionan las instalaciones. En general, los modelos virtuales en tiempo real permiten simular y analizar el comportamiento de los activos físicos, lo que mejora la toma de decisiones y la eficiencia operativa. En este orden de ideas, es fundamental precisar las estrategias para implementar y transferir esta tecnología en el sector de infraestructura.

Ante todo, la transformación digital sugiere que la adopción y el uso de tecnologías digitales son elementos clave para multiplicar el impacto económico de la inversión en infraestructura y mejorar el desempeño de los servicios asociados. A su turno, esta transformación debe ser concebida como la apropiación de nuevas tecnologías para automatizar procesos y reducir costos, con un impacto notable de “disrupción tecnológica” que afecta la organización de las cadenas productivas y configura un cambio fundamental en la gestión de activos. Un impacto principal de esta disrupción está asociado al concepto de “generación de valor”, en el sentido de orientar los servicios de la infraestructura hacia privilegiar los consumidores o usuarios finales mediante el uso de las innovaciones digitales, para mejorar la calidad de vida de la población y contribuir al crecimiento económico, social y de desarrollo sostenible. De otro lado, la digitalización de la industria también mejora el ambiente de negocios en el que se desarrollan las actividades de infraestructura; en consecuencia, la

transformación digital del sector público es un factor clave, dado que está a su cargo la política pública y el marco institucional y normativo de los servicios.

La nueva era tecnológica requiere de instituciones y normativas sólidas y capaces de impulsar la transformación del sector de Infraestructura, al tiempo que debe mitigar los riesgos derivados de las nuevas tecnologías. Para tal desafío, es fundamental la asistencia técnica de los organismos internacionales y las instituciones multilaterales y financieras de desarrollo para los países en vía de progreso. En tal sentido, se debe fortalecer el talento humano con conocimiento digital en el sector público, además de estandarizar e integrar procesos, actualizar los sistemas de contratación pública, modernizar la infraestructura digital de las instituciones, facilitar la interoperabilidad con otras instituciones y actores del sector, incrementar la transparencia mediante datos abiertos, impulsar la generación y el intercambio de conocimiento regional e internacional, y estrechar la colaboración con los sectores privado y académico, para reducir barreras e incentivar la innovación y adopción de tecnologías digitales.

El desarrollo de talento digital incluye la promoción y fomento de habilidades digitales en la ciudadanía, mediante la educación y la formación profesional, así como también el progreso en la investigación y la innovación en el ecosistema digital. Con particular referencia al sector de Infraestructura se requiere: (i) promover una cultura abierta a la innovación al interior de las instituciones y empresas del sector; (ii) formar a su personal en nuevas habilidades relacionadas con la tecnología digital e incorporar nuevo personal especializado en las mismas; (iii) establecer una relación más cercana con el sector educativo, para que pueda generar el talento digital requerido; (iv) realizar un acercamiento con la academia para crear espacios de capacitación y atraer talentos jóvenes al sector; (v) destinar recursos para la

investigación aplicada, en coordinación con la academia y el sector privado; y (vi) facilitar el desarrollo del ecosistema de proveedores de tecnología para el sector.

En resumen, un plan de acción de “Gestión Tecnológica” en línea con los retos institucionales se debe focalizar en impulsar la transformación digital de las empresas privadas proveedoras de servicios de infraestructura, de las entidades y agencias del sector público, y de los usuarios finales. Para el efecto, la gestión tecnológica centrará sus acciones a fortalecer los siguientes cuatro elementos de la transformación digital: gobernanza e institucionalidad; marco normativo; talento digital; e infraestructura y herramientas digitales.

4.3. Divulgación de la Investigación

La metodología Design Science Research (DSR) se centra en la creación y evaluación de artefactos diseñados para resolver problemas identificados y mejorar las capacidades en distintos dominios; dentro de este contexto, la "divulgación de conocimiento" es una actividad fundamental para socializar los aspectos principales en desarrollo de la investigación.

En especial, la divulgación comprende el proceso de compartir los hallazgos, conocimientos, artefactos, beneficios y limitaciones, y recomendaciones sobre investigaciones futuras; todo lo anterior, generado a lo largo del ciclo de investigación para ser compartido con la comunidad académica, profesional, del sector de infraestructura y demás partes interesadas.

Para el caso específico, es importante destacar la difusión de la solución propuesta para la problemática previamente identificada en el sector de infraestructura de riesgo de “Data Governance”, consistente en la pérdida sistémica del valor de la información, tanto en cantidad como en calidad, a través de las etapas del horizonte de vida económica de los activos viales. En ese mismo sentido, se busca que otros investigadores y profesionales validen y apliquen los

hallazgos en diferentes contextos, contribuyendo así a la validez externa del estudio. Desde luego, también hace parte de la divulgación, la obtención de comentarios y críticas que pueden ser aprovechadas para la mejora continua de la solución presentada.

La socialización de la experiencia de investigación tiene especial sentido como una actividad esencial en la educación y formación de profesionales de la ingeniería, en el área de gerencia de infraestructura vial, con el objeto de facilitar el aprendizaje y la adopción de nuevas tecnologías, métodos y conocimientos en la práctica académica y de la propia disciplina.

Para el efecto, de la presente investigación se han producido dos artículos, uno orientado al componente de gestión gerencial de activos viales y el segundo enfocado a la administración del riesgo 'Data Governance' en el modelo de negocio de Participación Público-Privada; la primera de estas ponencias, se presentó en el Open Internacional de Ingeniería (Sociedad Santandereana de Ingenieros, Bucaramanga 2022) y en el Congreso Nacional de Ingeniería (Sociedad Colombiana de Ingenieros, Barranquilla 2023); la segunda fue expuesta en el XIII Congreso Internacional de Nuevas Tecnologías (Expotecnología, Cartagena 2023).

De otra parte, en la revista “UIS Ingenierías” (vol. 23, n. 1, 2024) se publicó el artículo relacionado con el riesgo 'Data Governance', titulado “Aproximación al diseño conceptual de la gestión de carreteras inteligentes: una referencia a modelos de participación público-privada”.

La investigación se ha presentado en la comisión técnica permanente de Economía, Planeación y Asuntos Gubernamentales - EPAG, de la “Sociedad Colombiana de Ingenieros -

SCI” organismo consultivo de Gobierno Nacional, como documento de estudio para la construcción de propuestas sobre la política pública del sector de infraestructura.

En resumen, con las anteriores actividades se ha buscado compartir los avances y la experiencia de investigación para un amplio espectro de públicos, promoviendo el conocimiento y la práctica en el área de Gestión y Desarrollo Tecnológico en Ingeniería, dentro del Programa UIS de Doctorado en Ingeniería.

4.4. Beneficios, Limitaciones y Retos

La tecnología Digital Twins alineada con la gestión de activos viales ofrece interesantes oportunidades para contribuir en las soluciones estratégicas de la infraestructura de transporte, en todas las etapas de su ciclo de vida, logrando mayores niveles de eficiencia económica y de sostenibilidad integral del modelo de negocio -en este caso de PPP-; al mismo tiempo, está circunstancia plantea importantes retos al sector en materia de transformación digital y de inteligencia de negocios -Business Intelligence-, con la finalidad apremiante de optimizar la prestación de los servicios y mejorar la calidad de vida de la población en general.

En suma, la creación y desarrollo de Digital Twins para la gestión de activos viales tiene tres aplicaciones fundamentales, en primer lugar, en la etapa de estudios y diseños se genera un prototipo de la infraestructura para analizar su comportamiento de manera ex-ante y tomar decisiones inteligentes en todo el ciclo de vida. En segundo término, construida la infraestructura vial se dispone del gemelo digital para simular escenarios de operación/explotación del activo físico, con el fin de dar solución oportuna a las contingencias en la prestación del servicio y/o uso de las instalaciones; y por último, en la etapa de funcionamiento se agrega mayor información sobre la respuesta real del activo vial a los requerimientos propios del mercado, para lograr enriquecer y facultar el gemelo digital a

estados de autodeterminación y automatización en entornos predictivos y prescriptivos, que permita ofrecer una propuesta de generación de valor para atender satisfactoriamente las necesidades de la demanda del servicio.

De estas aplicaciones fundamentales se concluye que la problemática de gobernanza de la información en los modelos tradicionales de gestión de activos viales, -caracterizada por la pérdida sistemática de la “data” en cuanto a cantidad y calidad a través de las etapas del ciclo de vida, que configura riesgos gerenciales de extremo costo para todos los agentes/stakeholders participantes en la operación/explotación de la infraestructura, por procesos irregulares de toma de decisiones no informadas objetivamente-, puede ser solucionada mediante el desarrollo e implementación de la tecnología Digital Twins, dada su naturaleza de permitir disponer en tiempo real de la “total data” acumulada y escalada durante la vida económica del activo, para tomar decisiones informadas que mitiguen el riesgo gerencial en la gestión de activos.

En efecto, con el gemelo digital es posible crear un entorno de alta dirección basado en datos que instrumenten una estrategia de administración del riesgo de gobernanza de la información, como parte de la una cultura empresarial sólida y transparente alineada con el modelo de negocio de PPP y los particulares intereses de los distintos “jugadores” que intervienen en las etapas del horizonte de explotación económica de los activos. En especial, se puede concebir una infraestructura vial más eficiente, productiva y resiliente en su generación de valor-social, económico, ambiental y sostenible integralmente-, que contribuirá a la concepción de carreteras inteligentes o “Smart Roads”, basadas en la integración de diferentes soluciones tecnológicas.

En ese orden, en las grandes infraestructuras viales son evidentes los beneficios que se pueden estimar por ahorros de tiempo y costo en las operaciones propias de las instalaciones - mantenimiento, rehabilitación, reposición, optimización producto de las decisiones soportadas

en la información requerida, confiable y objetiva en la gestión gerencial de los activos. Así mismo, la tecnología Digital Twins permitirá beneficios potenciales derivados de la mejora continua en la prestación del servicio o uso de la infraestructura, al prever oportunamente las estrategias logísticas y operacionales de mayor generación de valor para atender la demanda del servicio de transporte.

De manera específica, los gemelos digitales pueden ayudar a mejorar la gestión de las instalaciones viales, ofreciendo, entre otros, los siguientes beneficios:

- Permite monitorear el estado, comportamiento y rendimiento de los activos viales en tiempo real, así como anticipar su deterioro y programar oportunamente su mantenimiento.
- Facilita la simulación de diferentes situaciones o eventos que puedan afectar a los activos viales, como el tráfico, el clima, los accidentes o demás intervenciones sobre el servicio.
- Posibilita la evaluación de distintas alternativas o soluciones para mejorar la eficiencia, la seguridad o la sostenibilidad de los activos viales.
- Favorece la integración y la comunicación entre los diferentes agentes/ stakeholders en la gestión de los activos viales, como las entidades o agencias públicas, las empresas concesionarias, las firmas consultoras, constructoras y/o operadoras, y los usuarios.

Por otra parte, como quiera que las innovaciones tecnológicas requieren de procesos de desarrollo e implementación hasta obtener un nivel de maduración apropiado, que pueden ser complejos en determinadas circunstancias, pues debe abordarse su introducción en la etapa de operación/explotación sin experiencias previas en el sector de infraestructura vial, con ausencia de plataformas estandarizadas para su adopción o de desarrollos de adaptación de otros sectores más avanzados y consolidados en el uso de la tecnología Digital Twins. En ese sentido, seguramente las propuestas comerciales deben provenir de las industrias de alto componente

de manufactura, como el sector automotriz y aeroespacial, e igualmente de los grandes conglomerados tecnológicos.

La integración de gemelos digitales con los sistemas existentes es otro elemento importante para su adopción efectiva, sin embargo, puede ser una tarea complicada y de amplio plazo si no hay compatibilidad e interoperabilidad entre las soluciones tecnológicas. Estas contingencias pueden generar importantes limitaciones y demandar actividades adicionales de desarrollo de interfaces de comunicación y/o modificaciones de aplicaciones vigentes.

En algunos casos, la implementación de gemelos digitales puede demandar importantes recursos de capital, por las inversiones en tecnología de hardware y software, vinculación y contratación de personal especializado, además de los costos y tiempos asociados a los periodos de diseño, desarrollo y puesta en marcha. No obstante, estos procesos pueden ser desafiantes para las organizaciones y, en toda situación, deben requerir de programas de gestión del cambio para el fortalecimiento y habilitación del talento humano, que asegure el éxito de la implementación tecnológica.

4.5. Futuras Investigaciones

En los próximos años, el sector de infraestructura vial continuará su transformación digital a la par con las innovaciones tecnológicas de la industria 4.0, para mejorar la utilización de las instalaciones físicas y atender eficientemente las necesidades futuras de la población, bajo criterios de sostenibilidad integral y un nuevo entorno de desarrollo económico y social.

En particular, la tecnología Digital Twins en el sector de infraestructura vial ofrece un inmenso potencial de transformación de los procesos de gestión para migrar hacia un ecosistema de “Smart Road”, contribuyendo a obtener activos más eficientes, sostenibles y modernos; y en todo caso, propendiendo por un servicio u operación/explotación de las

instalaciones con un enfoque hacia el usuario final, que privilegie el bienestar colectivo con un notable impacto global sobre el desarrollo social. A nivel global, las inversiones en instalaciones de transporte para satisfacer los requerimientos continuos de los mercados, al igual que la obsolescencia y deterioro de la infraestructura, exigen sistemas de gestión con mayores capacidades gerenciales que faciliten la operación/explotación eficiente de los activos; en consecuencia, hace sentido que a partir del modelo conceptual presentado se continúe con las actividades requeridas para su desarrollo, implementación y emplazamiento en el sector de infraestructura vial.

Por el mismo estado del arte, se puede concluir que el futuro de Digital Twins en la gestión de activos de infraestructura vial ofrece interesantes y positivas expectativas, al paso de los avances e innovaciones de la industria 4.0 con la creación de sistemas más inteligentes y totalmente conectados. En consecuencia, el espacio para futuras investigaciones y avances de la ciencia es bastante amplio y promisorio, con temas como: los sistemas de sensorización para captura y administración de gran cantidad de datos, los diseños y desarrollos de casos de uso y aplicaciones específicas en el sector de infraestructura vial, la resiliencia y optimización de las operaciones de los activos, la gestión del servicio orientada a la satisfacción del usuario final, entre otros.

En los próximos años, el sector de infraestructura vial continuará su transformación digital a la par con las innovaciones tecnológicas de la industria 4.0, para mejorar la utilización de las instalaciones físicas y atender eficientemente las necesidades futuras de la población, bajo criterios de sostenibilidad integral y un nuevo entorno de desarrollo económico y social.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO. (2013). AASHTO Transportation Asset Management Guide-A Focus on Implementation. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
<http://www.fhwa.dot.gov/asset/pubs/hif13047.pdf>
- Adekunle, S. A., Aigbavboa, C. O., Ejohwomu, O., Adekunle, E. A., & Thwala, W. D. (2021). Digital transformation in the construction industry: a bibliometric review. *Journal Of Engineering, Design and Technology*, 22(1), 130-158. <https://doi.org/10.1108/jedt-08-2021-0442>
- Agdas, D., & Ellis, R. (2019). IT in transportation construction: Opportunities and barriers to implementation. EG-ICE 2010 - 17th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering.
- Alarcón, C. L. F., & Pellicer, A. E. (2009). La producción sin pérdidas aplicada a la construcción. *Revista de Obras Públicas*, 45–52.
- Albis, M. A. (2008). Ciclos y fases de la identificación de proyectos. *Universidad del Norte*.
<https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/2202/Ciclo%20del%20proyecto.pdf>
- Albornoz, D. (2018). ¿Qué es y para qué sirve el modelado paramétrico en la tecnología BIM? *Deusto*. <https://www.deustoformacion.com/blog/bim-autocad-revit/que-es-para-que-sirve-modelado-parametrico-tecnologia-bim>
- Amendola, L.J. (2015). *Gestión Integral de Activos Físicos: Business Solutions Asset Management Maintenance Framework*. PMM Institute for learning.

Área de Proyectos del ILPES/CEPAL. (2012). Guía Metodológica para la Identificación, Formulación y Evaluación de Proyectos de Infraestructura Vial en Costa Rica. *Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica*.

Asset Management Technical Committee of WRA (PIARC). (2017). Asset Management Manual -A Guide for Practitioners. World Road Association.

Azhar, N., Kang, Y., & Ahmad, I. U. (2014). Factors influencing integrated project delivery in publicly owned construction projects: An information modelling perspective. *Procedia Engineering*, 77, 213–221. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.019>

Azhar, S., Hein, M., & Sketo, B. (2008). Building Information Modeling (BIM): Benefits, Risks and Challenges. *Semantic Scholar*. [https://www.semanticscholar.org/paper/Building-Information-Modeling-\(-BIM-\)-%3A-Benefits-%2C-Azhar-Hein/f06d49120df6b73e1a43008edd3c89141e91dbe3](https://www.semanticscholar.org/paper/Building-Information-Modeling-(-BIM-)-%3A-Benefits-%2C-Azhar-Hein/f06d49120df6b73e1a43008edd3c89141e91dbe3)

Aziz, A. (2017). Leveraging BIM and big data to deliver well maintained highways. *Emerald insight*, 35 (13/14), 818-832. <https://doi.org/10.1108/F-02-2016-0021>

Babalola, O., Ibe, E. O., & Ezema, I. C. (2019). Implementation of lean Practices in the Construction Industry: A Systematic review. *Building and Environment*, 148, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.051>

Banco Interamericano de Desarrollo BID. (2019). *Estado de la Gestión de Activos Viales en América Latina y el Caribe*. Flitsch, Gerardo W. <https://publications.iadb.org/es/estado-de-la-gestion-de-activos-viales-en-america-latina-y-el-caribe>

- Bedian, M. P. (2002). Value engineering and its rewards. *Leadership and Management in Engineering*, 2(2), 36–37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-6748\(2002\)2:2\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-6748(2002)2:2(36))
- Beedles, M. (2016). *Asset management for directors*. Australian Institute of Company Directors.
- Bohórquez-Castellanos, J. J., Porrás-Díaz, H., Sánchez-Rivera, O. G., & Mariño-Espinel, M. C. (2018a). Planificación de recursos humanos a partir de la simulación del proceso constructivo en modelos BIM 5D. *Entramado*, 14 (1), 252–267. <https://doi.org/10.18041/entramado.2018v14n1.27141>
- Bravo, J. F. (2015). *Financiación de proyectos de infraestructura vial de cuarta generación (4G) en Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Archivo digital. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13174>
- Broo, D. G., & Schooling, J. (2021). Digital Twins in Infrastructure: Definitions, current practices, challenges and strategies. *The international journal of construction management*, 23(7), 1254-1263. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>
- Campbell, J., Jardine, A., & McGlynn, J. (Second edition). (2016). *Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. CRC Press.
- Choclán Gámez, F., Soler Severino, M., & González Márquez, R. J. (2014). Introducción a la metodología BIM. *Spanish Journal of Building Information Modeling*, 14 (1), 4-10. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5413529>
- Comité technique AIPCR D.1, & Gestion du patrimoine routier/ PIARC Technical Committee D.1 - Management of road infrastructure assets. (2019). *Enfoques innovadores para la gestión de activos*. <https://www.piarc.org/es/pedido-de-publicacion/31221-es->

Enfoques%20innovadores%20para%20la%20gesti%C3%B3n%20de%20activos

Committee of transport officials. (2013). Draft TMH 22 Road Asset Management Manual. The

South African National Roads Agency Limited.

https://www.transport.gov.za/documents/11623/264644/TMH22_COTO_V8b_Draft_compressed.pdf/3fc74387-3387-4462-9c49-b00c92307ae5

Cook, M., & Garrett, D. (2014). *Green Home Building: Money-Saving Strategies for an Affordable, Healthy, High-Performance Home*. New Society Publisher.

Costin, A. (2016). *A new methodology for interoperability of heterogeneous bridge information models*. [Tesis doctoral, Georgia Institute of Technology]. Archivo digital.

<https://www.semanticscholar.org/paper/A-new-methodology-for-interoperability-of-bridge-Costin/679a5965e363f374d9917b42fdb77f12bbb3de6a>

Costin, A., Adibfar, A., Hu, H., & Chen, S. S. (2018). Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, 94, 257–281.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>

Daniotti, B., Pavan, A., Bolognesi, C. M., Mirarchi, C., & Signorini, M. (2022). Digital transformation in the construction sector: From BIM to Digital twin. *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.103726>

Davis, R. (2017). Introducción a la gestión de activos Una introducción simple pero informativa sobre la gestión de activos físicos. *Asset Management*. <https://eatechnology.com/media/idrjutri/introduccion-a-la-gestion-de-activos-espa%C3%B1ol.pdf>

De Solminihaç, H., Echaveguren, T., & Chamorra, A. (2019). *Gestión de infraestructura vial*. Alfaomega U.C de Chile.

Deadman, C. (2010). *Strategic Asset Management: The quest for utility excellence*. Matador. Department of Transportation, Federal Highway Administration Office of Transportation Performance Management, Washington, DC. (2016). *Transportation Performance Management Capability Maturity Model*. <https://www.tpmtools.org/wp-content/uploads/2016/09/tpm-cmm.pdf>

Depool, T. (2016). Impacto de los CAPEX y OPEX en la gestión de activos. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8237898>

Dresch, A., Lacerda, D. P., & Antunes, J. A. V., Jr. (2015). Design science research. En Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07374-3>

El Asmar, M., Hanna, A. S., & Loh, W. Y. (2013). Quantifying performance for the integrated project delivery system as compared to established delivery systems. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(11), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000744](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000744)

ESAN. (2019, febrero 12). Modelo Integrated Project Delivery: su papel en el sector de construcción. <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2019/02/modelo-integrated-project-delivery-su-papel-en-el-sector-de-construccion/>

Esther Paik, J., Miller, V., Mollaoglu, S., & Aaron Sun, W. (2017). Interorganizational Projects: Reexamining Innovation Implementation via IPD Cases. *Journal of Management in Engineering*, 33 (5), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000524](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000524)

- EU BIM Task Group. (2018). Manual para la introducción del BIM por parte del sector público europeo. <http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2018/02/GROW-2017-01356-00-00-ES-TRA-00.pdf>
- Evans, R. et al. (1998). *The long term costs of owning and using buildings study*. Royal Academy of Engineering. <https://www.worldcat.org/es/title/long-term-costs-of-owning-and-using-buildings/oclc/78322290>
- Fakhimi, A., Sardroud, J., & Azhar, S. (2016). How can lean, IPD and BIM work together? [simposio]. *33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2016)*, Auburn, USA. <https://www.iaarc.org/publications/fulltext/ISARC2016-Paper018.pdf>
- Fountain, J., & Langar, S. (2018). Building Information Modeling (BIM) outsourcing among general contractors. *Automation in Construction*, 95, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.009>
- Fuentes, B. (2014). *Impacto de BIM en el proceso constructivo español*. Servicios y comunicación LGV. <https://www.marcialpons.es/libros/impacto-de-bim-en-el-proceso-constructivo-espanol/9788494259319/>
- Geerts G. (2011). A design science research methodology and its application to accounting information systems research. *International Journal of Accounting Information Systems*, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.accinf.2011.02.004>
- Gómez, J. (2016, agosto 5). BIM for management and maintenance. *BIM Community*. <https://www.bimcommunity.com/news/load/230/bim-para-la-gestion-y-el-mantenimiento>

- Giovanny, O., Alberto, S., & Yerson, G. (2017). BrIM 5D models and Lean Construction for planning work activities in reinforced concrete bridges Modelos BrIM 5D y Lean Construction para planificar actividades de. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26 (46), 39–50. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.19053/01211129.v26.n46.2017.7314>
- Grieves, M. (2014). "Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries: A Review." *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 409-418.
- Hardin, B., & McCool, D. (2015). *BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows* (Second). Wiley.
- Harris, V. (2016). *BIM BAM BOOM Theory*. BIM training academy.
- Hevner A. & Chatterjee S. (2010). *Design Research in Information Systems: Theory and Practice*. Springer. DOI 10.1007/978-1-4419-5653-8
- Hevner A. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19 (2), 87-92. <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1017&context=sjis>
- Hevner A., March S., Park J., & Ram S. (2004) Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28 (1), pp. 75-105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hevner, A.R., March, S.T., Park, J.: Design Research in Information Systems Research. *MIS Quarterly* 28, 75-105 (2004)
- Industry experts. (2014). *The (New) Asset Management Handbook: The Guide to ISO55000*. Reliabilityweb.com Press
- Institute of Public Works Engineering Australia (IPWEA) y New Zealand Asset Management

Support (NAMS). (s.f). Manual internacional de la gestión en infraestructuras (5ta ed.).

<http://www.nams.org.nz/pages/6/manuals---guidelines.htm>

ISO 19650-1:2019: Parte 1: Conceptos y principios. (2020). Normalización Española (UNE).

<https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-19650-1-2019-n0062137>

ISO 19650-2:2019: Parte 2: Fase de desarrollo de los activos. (2020). Normalización Española

(UNE). <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-19650-2-2019-n0062138>

Jamil, A, & Fathi, M. (2016). The Integration of Lean Construction and Sustainable

Construction: A Stakeholder Perspective in Analyzing Sustainable Lean Construction

Strategies in Malaysia. *Procedia Computer Science*, 100, 634–643.

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.205>

K. Reyes Burgos y J. Aquino Trujillo, Investigación en las ciencias del diseño: Aplicación en

los contextos de computación y tecnología. Chiclayo: Universidad Católica Santo

Toribio de Mogrovejo, 2023.

Kartam, N. & Levitt, R. (1990). Intelligent Planning of Construction Projects. *Journal of*

Computing in Civil Engineering, 4 (2), 155–176.

<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290887->

[3801%281990%294%3A2%28155%29](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290887-3801%281990%294%3A2%28155%29)

Lloyd, C. (2010). *Asset management. Whole-life management of physical assets*. Thomas Telford

Limited. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/amwmps.36536#>

López, J. (2020). *Gerencia de proyectos y el ecosistema del proyecto basado en BIM V*. Big

Management. [https://bimanagement.co/2020/02/06/gerencia-de-proyectos-y-el-](https://bimanagement.co/2020/02/06/gerencia-de-proyectos-y-el-ecosistema-del-proyecto-basado-en-bim-v/)

[ecosistema-del-proyecto-basado-en-bim-v/](https://bimanagement.co/2020/02/06/gerencia-de-proyectos-y-el-ecosistema-del-proyecto-basado-en-bim-v/)

- Macchi, M., Roda, I., Negri, E. & Fumagalli, L. (2018). Exploring the role of Digital Twin for Asset Lifecycle Management. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11):790-795. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.415.
- Martínez-Manso, H., & Delgado-Fernández, T. (2022). Arquitectura básica de diseño de gemelos digitales para la construcción. *Revista de Investigación, Desarrollo E Innovación/Revista de Investigación Desarrollo E Innovación*, 12(2), 327-336. <https://doi.org/10.19053/20278306.v12.n2.2022.15275>
- Mazuera Parraga, M. (2014). *Gerencia de Planeación Para la Infraestructura Vial Nacional* [trabajo de grado de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Unimilitar. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/12559>
- McGlynn, J., & Knowlton, F. (2011). "Chip". Asset Classes and the World of Life-Cycle Asset Management. En Campbell, J., Jardine, A., & McGlynn, J (Ed.s). *Asset Management Excellence Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. CRC Press.
- McNaughton, B., Ray, P., Lewis, L.: Designing an Evaluation Framework for IT Service Management. *Information & Management* 47, 219-225 (2010)
- McNaughton, B., Ray, P., Lewis, L.: Designing an Evaluation Framework for IT Service Management. *Information & Management* 47, 219-225 (2010)
- Mohamed, A. (2020). Ingeniería de Gestión del Valor (Miles y Erlicher). *12MANAGE*. https://www.12manage.com/methods_miles_value_engineering_es.html
- Moreno, G. M. (2017). *Implementacion BIM Etapa de diseño*. 8.
- Narváz Pupíales, J. (2013). *Planeamiento vial, programación de obras viales, planes de desarrollo vial* [Universidad central del ecuador Facultad de ingeniería, ciencias físicas y

matemática]. Archivo digital.

https://www.academia.edu/5876990/169907465_DEBER_1_Planeamiento_Vial

Normas ISO 19650. (2020). Organización y digitalización de la información en obras de edificación e Ingeniería Civil que utilizan BIM (Building Information Modelling). Gestión de la información al utilizar BIM (Building Information Modelling). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0065853>

Ocampo, J. (2015). La Gerencia Bim Como Sistema Bim As the Management System. *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, 14 (38), 17–29. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5161779>

Olaitan, O., Herselman, M., & Wayi, N. (2019). A Data Governance Maturity Evaluation Model for government departments of the Eastern Cape province, South Africa. *South African Journal of Information Management*, 21(1). <https://doi.org/10.4102/sajim.v21i1.996>

Organización Internacional de Normalización (ISO) 19650-3. (2020). *Fase operativa de los activos*. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:19650:-3:ed-1:v1:en>

Organización Internacional de Normalización (ISO) 55000. (2014). *Gestión de activos — Aspectos generales, principios y terminología*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es>

Organización Internacional de Normalización (ISO) 55001. (2014). *Gestión de activos - Sistemas de gestión - Requerimientos*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55001:ed-1:v1:es>

Organización Internacional de Normalización (ISO) 55002. (2014). *Gestión de activos - Sistemas de gestión - Directrices para la aplicación de ISO 55001*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:55002:ed-1:v2:es:sec:A>

- Ouertani, M., Parlikad, A. & Mcfarlane, D. (2008). Towards an Approach to Select an Asset Information Management Strategy. *International Journal of Computer Science and Applications* 5 (3), 25-44. https://www.researchgate.net/publication/26621987_Towards_an_approach_to_Select_a_n_Asset_Information_Management_Strategy
- Pearl Ferguson, C. (2011). *BIM, BAM, BOOM. The life of a Building Information Model* [trabajo de grado, University College]. Archivo digital. <https://es.scribd.com/document/472472449/BIM-BAM-BOOM-Charmaine-Ferguson-22112011-pdf>
- Peffer K., Tuunanen T., Rothenberger M., & Chatterjee S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24 (3), 45-77. https://www.researchgate.net/publication/284503626_A_design_science_research_methodology_for_information_systems_research
- Peffer, K., & Tuunanen, T. (2005). Planning for IS applications: a practical, information theoretical method and case study in mobile financial services. *Information & Management*, 42(3), 483-501. <https://doi.org/10.1016/j.im.2004.02.004>
- Peffer, K., et al. (2012, Mayo). The design science research process: A model for producing and presenting information systems research. [Conference Paper]
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal Of Management Information Systems*, 24(3), 45-77. <https://doi.org/10.2753/mis0742-1222240302>
- Perera, S., De Silva, S., Osei-Kyei, R., Yin, Y., Zhou, L., Jin, X., Fernando, N., Babatunde, S., & Feng, Y. (2019). BIM Execution Framework for early-stage estimating in PPP projects.

- Platfoot, B. (2020). *Realizing Commercial Value from ISO55001 Aligned Asset Management*. Uptime. <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/realizing-commercial-value-from-iso55001-aligned-asset-management>
- Pons, A. (2014). Introducción a Lean Construction Introduccion a ean construction. *Fundación Laboral de la Construcción*. <http://www.juanfelipepons.com/wp-content/uploads/2017/02/Introduccion-al-Lean-Construction-1.pdf>
- Porras H., Sánchez O., & Galvis, J. (2014). Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual. *Investigación en Ingeniería*, 11 (1), 32–53. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.298>
- Quintanilla, S. (2015). *¡BIM-BAN-BOOM! La onda expansiva del diseño y modelado virtual*. <https://www.mundohvacr.com.mx/2017/08/bim-ban-boom-la-onda-expansiva-del-diseno-modelado-virtual/>.
- Rachwan, R., Abotaleb, I., & Elgazouli, M. (2016). The Influence of Value Engineering and Sustainability Considerations on the Project Value. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 431–438. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.038>
- Ruitenburg, R., Braaksma, A., & Van Dongen, L. (2014). A multidisciplinary, expert-based approach for the identification of lifetime impacts in Asset Life Cycle Management. *Procedia CIRP*, 22 (1), 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.007>
- Ryzhakova, G., Malykhina, O., Pokolenko, V., Rubtsova, O., Homenko, O., Nesterenko, I., & Honcharenko, T. (2022). Construction Project Management with Digital Twin Information System. *International Journal Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(10), 19-28. https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03

- Ryzhakova, G., Malykhina, O., Pokolenko, V., Rubtsova, O., Homenko, O., Nesterenko, I., & Honcharenko, T. (2022b). Construction Project Management with Digital Twin Information System. *International Journal Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(10), 19-28. https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., & Owen, R. (2010). Interaction of lean and building information modeling in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968–980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203)
- Save International. (2019). About the Value Methodology. *Save Adding Value Enhancing Ideas*. <https://www.value-eng.org/page/AboutVM>
- Šelih, J., Kne, A., Srdić, A., & Žura, M. (2008). Multiple-criteria decision support system in highway infrastructure management. *Transport*, 23(4), 299–305. <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.299-305>
- Sierra Aponte, L. (2016). *Gestión de proyectos de construcción con metodología BIM “Building Information Modeling* [Tesis de especialización, Universidad Militar de Granada]. Archivo digital. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/14970/SierraLinaA%20C3%B1o2016.pdf?sequence=2>
- Skandhakumar, N., Salim, F., Reid, J., Drogemuller, R., & Dawson, E. (2016). Graph theory based representation of building information models for access control applications. *Automation in Construction*, 68, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.001>
- Sleiman, H., & Burdi, L. (2015). BIM Guidelines for vertical and horizontal construction. *Massachusetts Port Authority. Capital Programs and Environmental*, 1(4), 1–72. <https://www.massport.com/media/1143/bim-guide-071715-disc.pdf>
- Sözüer, M., & Spang, K. (2012). Challenges in the planning process of infrastructure projects in

Germany. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*. <https://doi.org/10.1061/9780784412329.238>

Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>

Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals*, 67(1), 169-172. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>

Tchana, Y., Ducellier, G., & Remy, S. (2019). Designing a unique digital twin for linear infrastructures lifecycle management. *Procedia CIRP*, 84, 545-549. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>

The Institute of Asset Management. (2015). *Asset Management - An Anatomy. Version 3*. Theiam. https://theiam.org/media/1486/iam_anatomy_ver3_web-3.pdf

The Institute of Asset Management. (2015). Gestión de activos: una anatomía. Theiam.org. <https://theiam.org/media/2908/iam-gesti%C3%B3n-de-activos-una-anatom%C3%ADa-anatomy.pdf>

The Institute of Asset Management. (2015). *Metodología de Autoevaluación SAM*. Theiam.org. <https://theiam.org/self-assessment-methodologyplus-sam-plus/>

Tohidi, H. (2011). Review the benefits of using value engineering in information Technology project management. *Procedia Computer Science*, 3, 917-924. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.12.150>

Toro L. V., M. (2012). *La Planificación: Conceptos Básicos, Principios, Componentes, Características y Desarrollo del Proceso*. WordPress.com. <https://nikolayaguirre.files.wordpress.com/2013/04/1-introduccic3b3n-a-la-planificac3b3n1.pdf>

- Torres Macías, Á. (2008). Trends in Consulting Engineering for Major Projects. *Revista de Ingeniería*, 27. <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n27/n27a9.pdf>
- Van Damme, O., Van Geelen, H., & Courange, P. (2016). The Evaluation of Road Infrastructure Development Projects. *Transportation Research Procedia*, 14, 467–473. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.099>
- Van Rensburg, J. J., & Goede, R. (2019). A Model for Improving Knowledge Generation in Design Science Research through Reflective Practice. *Electronic Journal of Business Research Methods*, 17(4). <https://doi.org/10.34190/jbrm.17.4.001>
- Venable, J., Pries-Heje, J., & Baskerville, R. (2016). FEDS: a Framework for Evaluation in Design Science Research. *European Journal of Information Systems*, 25(1), 77-89. <https://doi.org/10.1057/ejis.2014.36>
- Venable, J., Pries-Heje, J., & Baskerville, R. (2016b). FEDS: a Framework for Evaluation in Design Science Research. *European Journal Of Information Systems*, 25(1), 77-89. <https://doi.org/10.1057/ejis.2014.36>