

ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE DURACIONES EN LA
EJECUCIÓN DE LOS PAQUETES DE TRABAJO DE CONCRETO Y ACERO EN
LA PLANIFICACIÓN DE UN PROYECTO PUENTE TIPO

JESÚS DANIEL RANGEL CELIS
PABLO ANDRÉS CELIS ACOSTA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2021

ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE DURACIONES EN LA
EJECUCIÓN DE LOS PAQUETES DE TRABAJO DE CONCRETO Y ACERO EN
LA PLANIFICACIÓN DE UN PROYECTO PUENTE TIPO

JESÚS DANIEL RANGEL CELIS
PABLO ANDRÉS CELIS ACOSTA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Director:
HOMER ARMANDO BUELVAS MOYA
Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2021

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente darle las gracias a Dios por regalarnos la oportunidad de acceder a este proceso de formación profesional. A nuestros padres y demás familiares por el apoyo incondicional que nos brindan día a día para ser futuros ingenieros al servicio de la sociedad. A nuestro director, el ingeniero Homer Armando Buelvas por su dedicación y conocimiento durante el desarrollo de este estudio. A los docentes de la escuela de ingeniería civil por la transmisión de sus conocimientos. Finalmente, a todas las demás personas que nos acompañaron durante nuestros estudios de pregrado que nos aportaron experiencias y alegrías que nos permiten crecer como personas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. MARCO REFERENCIAL.....	15
2.1 ESTIMACIÓN DE DURACIÓN DE LAS ACTIVIDADES SEGÚN PMI	16
2.1.1 Plan de gestión del cronograma.....	16
2.1.2 Lista de actividades.....	16
2.1.3 Atributos de las actividades.....	16
2.1.4 Recursos requeridos para las actividades.....	17
2.1.5 Calendarios de recursos	17
2.2 TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE DURACIÓN DE LAS ACTIVIDADES	17
2.2.1 Juicio de expertos (JE).....	17
2.2.2 Estimación análoga (EA).....	17
2.2.3 Estimación paramétrica (EP).....	18
2.2.4 Estimación por tres valores o método PERT (Técnicas de Revisión y Evaluación de programas).	18
2.2.4.1 Estimación de tiempo más probable (tM). Se basa en duraciones que más se acerquen a las expectativas realistas del proyecto, es decir, el mejor tiempo.	18
2.2.4.2 Estimación de tiempo optimista (tO).....	18
2.2.4.3 Estimación de tiempo pesimista (tP).	18
2.3 PUENTE EN CONCRETO REFORZADO	19
2.3.1 Creación de EDT para construcción de puentes.....	19
2.4 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP)	20
2.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	20
2.6 VALOR DEL DINERO EN EL TIEMPO	21
3. ESTIMACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DEL PUENTE.....	23
3.1 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LAS TÉCNICAS	23
3.2 FACTORES DE IMPACTO EN LA HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN	26
3.2.1 Evaluación de incidencia.....	28
3.3 APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS AL MODELO DE UN PUENTE TIPO	33
3.3.1 Duraciones de las actividades.....	36
3.3.1.1 Estimación análoga (fase 1).....	36
3.3.1.2 PERT (fase 2).	38
3.3.2 Secuenciación de actividades y cronograma	38

3.3.3 Determinación del Presupuesto del proyecto	41
4. ANALISIS DE RESULTADOS.....	42
4.1 ESTUDIO DE LA RELEVANCIA EN LAS TÉCNICAS	42
4.2 RESULTADOS DEL MÉTODO AHP	43
4.3 EFECTO DE LAS TÉCNICAS APLICADAS.....	44
5. CONCLUSIONES	47
REFERENCIAS	48

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Falencias más comunes clasificadas dentro proyectos de puentes asociados a la herramienta de estimación	27
Tabla 2. Escala de impacto de AHP	30
Tabla 3. Pesos asociados al problema y técnicas presentes en cada uno	30
Tabla 4. Actividades base desagregadas de la EDT	37
Tabla 5. Rendimientos encontrados en proyectos de investigación similares, (1x1 hace referencia a un 1 oficial y un ayudante)	39
Tabla 6. Resultados del método de selección AHP	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Nivel de interacción de los procesos en un proyecto	15
Figura 2. Red de análisis bibliométrico restringiendo las palabras relacionadas con las herramientas de estimación de duraciones	24
Figura 3. Registro de datos de proyectos asociados a las técnicas de estimación.....	26
Figura 4. Estructura de análisis jerárquico adaptado al caso	29
Figura 5. Perfil longitudinal del puente tipo	34
Figura 6. EDT de proyecto tipo viga en concreto postensado.....	35

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos y pueden visualizarlos en la Base de datos de la Biblioteca UIS)

Anexo A. Modelo de selección de análisis jerárquico (AHP)

Anexo B. Diccionario de la EDT proyecto puente tipo viga I en concreto reforzado

Anexo C. Cronogramas Fase 1 y Fase 2

Anexo D. Presupuesto puente base Fase 1

Anexo E. Presupuesto puente base Fase 2

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE DURACIONES EN LA EJECUCIÓN DE LOS PAQUETES DE TRABAJO DE CONCRETO Y ACERO EN LA PLANIFICACIÓN DE UN PROYECTO PUENTE TIPO*

AUTOR: Jesús Daniel Rangel Celis** Pablo Andrés Celis Acosta**

PALABRAS CLAVE: Project Management Institute, gestión del tiempo, estimación de duraciones, PERT, estimación análoga, juicio de expertos.

DESCRIPCIÓN:

Dentro de la industria de la construcción de puentes en Colombia ha sido ampliamente estudiado cómo reducir la incertidumbre en los tiempos de ejecución en proyectos. Los gestores de proyectos tratan de anticiparse a los factores que afectan los tiempos de ejecución, implementando técnicas y herramientas que les permitan una entrega exitosa de los proyectos. Este estudio se centra en identificar la técnica de estimación de duraciones más adecuada según las buenas prácticas del Project Management Institute, apoyando su evaluación en revisión literaria y la incidencia de su uso en la planificación de un proyecto particular de construcción de un puente basado en paquetes de trabajo de concreto y acero. Se parte de un análisis cualitativo AHP para seleccionar las técnicas de estimación análoga y PERT como las técnicas con mayor opción de selección y que se implementan para comparar su influencia en los tiempos y costos del proyecto tipo. Se evidencia que la técnica PERT considera una mayor incertidumbre al momento de estimar duraciones de un proyecto, resultando en una duración de 321 días en comparación con la estimación análoga con 294 días y la duración del proyecto tipo con 306 días.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físico mecánicas. Universidad Industrial de Santander, Director: Homer Armando Buelvas Moya. Jesús Daniel Rangel Celis Estudiante Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander jesus.rangel2@correo.uis.edu.co.

** Facultad de Ingeniería. Universidad Industrial de Santander, Director: Homer Armando Buelvas Moya. Pablo Andrés Celis Acosta Estudiante Ingeniería Civil Universidad Industrial de Santander pablo.celis@correo.uis.edu.co.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE TECHNIQUES FOR THE ESTIMATION OF DURATIONS IN THE EXECUTION OF THE CONCRETE AND STEEL WORK PACKAGES IN THE PLANNING OF A TYPICAL BRIDGE PROJECT*

AUTHOR: Jesús Daniel Rangel Celis** Pablo Andrés Celis Acosta**

KEY WORDS: Project Management Institute, time management, duration estimation, PERT, analogous estimation, expert judgment.

DESCRIPTION:

The reduction of uncertainty in project execution times in bridge construction industry in Colombia has been widely studied. Project managers try to anticipate the external factors within execution times, they have been implementing techniques and tools that allow them to successfully deliver projects. This study focuses on identifying the most appropriate duration-estimation technique according to the good practices of the Project Management Institute. This research is supported in a literary review and the evaluation of the incidence on the planning of a particular project to build a bridge of concrete and steel. It starts from a qualitative AHP analysis to find the analogous estimation and PERT as the techniques with the greatest selection option and which are implemented to compare their influence on the times and costs of the typical project. It is evident that the PERT technique considers greater uncertainty when estimating project durations resulting in a duration of 321 days compared to the analogous estimate with 294 days and the duration of the typical project with 306 days.

* Degree work

** Faculty of physical mechanical engineering. Industrial University of Santander, Director: Homer Armando Buelvas Moya. Jesús Daniel Rangel Celis Civil Engineering Student at the Industrial University of Santander jesus.rangel2@correo.uis.edu.co.

** Faculty of Engineering. Industrial University of Santander, Director: Homer Armando Buelvas Moya, Pablo Andrés Celis Acosta Civil Engineering Student at the Industrial University of Santander pablo.celis@correo.uis.edu.co.

INTRODUCCIÓN

En la ejecución de proyectos de construcción se hace necesario realizar una buena gestión a la planificación que lleve consigo determinar cronogramas y presupuestos cercanos a la realidad y que cumplan las expectativas de los interesados. Se deben establecer tiempos y costos muy cercanos a los reales con el fin de determinar la viabilidad del proyecto.

Gran parte de los proyectos de construcción de infraestructura vial y puentes en Colombia presentan retrasos en sus cronogramas de ejecución. Para finales del año 2020, varios de los proyectos viales que incluyen puentes muestran rezago en sus tiempos de ejecución; el sistema de gestión de proyectos de infraestructura¹ registra que 3 de los puentes de importancia nacional presentan retrasos en sus cronogramas. Es evidente que en estos proyectos surge una disyuntiva entre lo planificado y lo ejecutado en la obra, donde la planeación inicial de estos proyectos evidencia una mayor importancia a lo largo de su desarrollo. Una correcta planificación inicial restringe la aparición de inconvenientes en la ejecución y control, evitando factores como sobrecostos o alargues en el cronograma que claramente los proyectos en mención no aplicaron.

El Project Management Institute (PMI) incluye la realización de 25 procesos en la etapa de planificación de un proyecto, donde entre otras, se busca realizar una correcta gestión del tiempo a través del uso de distintas técnicas para la estimación de duraciones de las actividades que deben ejecutarse. Si bien es cierto, los proyectos de construcción de puentes implementan alguna de estas herramientas y en su gran mayoría hacen uso de algunos expertos para estimar estos tiempos, Serpa y Tineo en su tesis de aplicación de las herramientas de gestión propuestas

¹ MINISTERIO DE TRANSPORTE. “Gestor de Proyectos de Infraestructura.” [Sitio web]. Bogotá: MINITRABAJO. [Consulta: 8 de diciembre 2020]. Disponible en: <https://gpi.mintransporte.gov.co/menuReports/lis>

en el PMBOK a un puente vehicular, demuestran que la mayoría de expertos seleccionados en el proyecto tienden a subestimar los tiempos ya que no tienen en cuenta aspectos tales como el malestar de los pobladores por las construcciones, incumplimiento de entrega de materiales, alza en sus precios y una supervisión idónea que garantice la calidad del proyecto². Al comparar los datos de PROVIAS con los planificados por Serpa y Tineo, se presentan retrasos evidentes en los tiempos de ejecución y esto se ve reflejado en un alza de presupuesto considerable.

Sanclemente, Rocha y Ramos en búsqueda de una continua mejora del sistema de gestión de proyectos, trataron de identificar los factores que afectan la construcción de un puente vehicular, para la estimación de duraciones usaron como base el criterio de los expertos en la planeación de la gestión del tiempo y posteriormente en el control y monitoreo de la obra se encuentran problemas relacionados a la prolongada duración de los carros de avance respecto a lo planificado³.

Otros autores como Olaya⁴ implementan en su proceso de planeación la metodología PERT en donde se encuentran en la ejecución del proyecto problemas asociados a los pilotes, adquisición de predios y firmas de asesoría externa afectando el tiempo de entrega del proyecto, pero los efectos no sobrepasan los ocasionados en la estimación por expertos. Finalmente, Maria⁵ en su tesis de investigación aplicada reconocen la importancia de la técnica de estimación análoga

² SERPA, Rocky Gustavo y TINEO, Carlos Antonio. "Dirección de proyecto con aplicación de la Guía del PMBOK®, en un proyecto de construcción de puente, Tesis de Maestría. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Programa de Maestría en Administración y Dirección de Proyectos, 2015. 279p.

³ ROCHA, Sandra Patricia; SANCLEMENTE, Elmer y RAMOS, Diana Lorena. "Construcción puente vehicular sobre el río Ortegua en el departamento de Caquetá. Tesis de Especialización. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2018. 225p.

⁴ OLAYA, Mónica Eneria; MONTAÑA, Juana y UMAÑA, Franz Alexis, "Estudios, diseño y construcción de los puentes vehiculares la Negra, Santiago y la Comba. Tesis de Especialización. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2019. 112p.

⁵ MARÍA, Forella Angelita y NARVÁEZ, Diego André. Guía PMBOK para mejorar la productividad en fabricación de puentes alma llena. División metal mecánica, empresa SIMA S.A. Chimbote. Tesis de Pregrado. Chimbote: Universidad César Vallejo. Facultad de ingeniería. Gestión Empresarial y Productiva, 2018. 145p.

(EA) para estimar duraciones y perciben un buen desempeño ya que el proyecto se mantiene sobre la línea base y los costos no sobrepasan lo planeado.

El uso de las técnicas de estimación de manera aleatoria no soluciona los problemas de retrasos, ya que no se realiza un estudio previo para determinar las ventajas y desventajas de estas herramientas en los tipos de proyectos de estudio.

Este documento entrega una recopilación aplicada de buenas prácticas para la planeación de duraciones de proyectos tipo puente al comparar algunas de las herramientas de estimación propuestas por el PMI, identificando la más adecuada según revisión literaria y estudiando su influencia en la duración total y el costo final de un proyecto de construcción de un puente de vigas en concreto.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la técnica más adecuada para la estimación de duraciones en la ejecución de los paquetes de trabajo de concreto y acero en la planificación de un proyecto puente tipo.

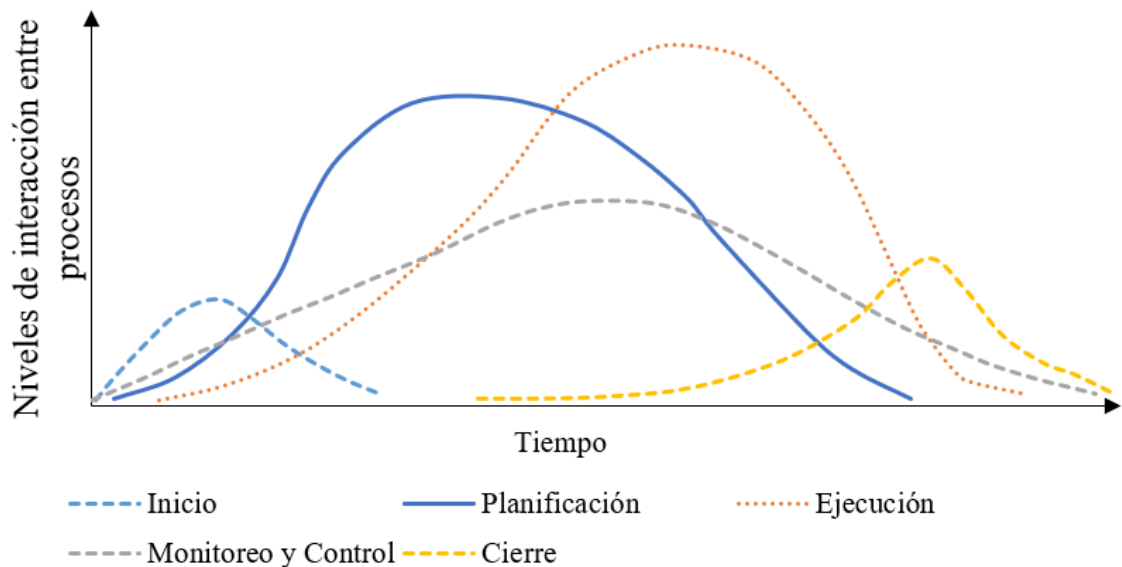
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar las técnicas y herramientas empleadas en la estimación de duraciones de actividades en el desarrollo de la gestión al tiempo en la etapa de planificación según el modelo PMI (Project Management Institute).
- Identificar la técnica más adecuada para la estimación de duraciones de los paquetes de trabajo relacionado con el recurso de mano de obra en la etapa de planificación de un proyecto de construcción de un puente de concreto tipo.
- Estudiar la influencia de la técnica de estimación de duraciones en los paquetes de trabajo de concreto y acero, en la duración final y costo total de un proyecto de construcción de un puente de concreto tipo.

2. MARCO REFERENCIAL

Se presentan los conceptos básicos alrededor de la planeación y la influencia de la estimación de las duraciones de las actividades en los proyectos en general, debido a que la planeación en la dirección de proyectos denota una gran relevancia por la constante interacción con los demás procesos que se presentan en el desarrollo de proyectos (figura 1).

Figura 1. Nivel de interacción de los procesos en un proyecto



Fuente: PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, “Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía de PMBOK),” Pensilvania: Newtown Square, 2013, p. 51-56.

Aunque el PMI a través de su guía de buenas prácticas Project Management Body of Knowledge (PMBOK) define la planeación como una actividad iterativa y continua sujeta a reconsideraciones a lo largo del ciclo de vida del proyecto, también resalta el beneficio de realizar una correcta gestión para alcanzar objetivos acordes en

aspectos tales como los tiempos y el costo⁶.

En relación con lo anterior, haciendo referencia a los tiempos, dentro de las diez áreas del conocimiento que abarca el PMBOK, se encuentra una de ellas dedicada especialmente al estudio de la gestión del tiempo, la cual se define como el proceso de realizar una estimación de la cantidad de trabajo necesario para finalizar las actividades individuales con los recursos estimados. El beneficio clave de este proceso es establecer la cantidad de tiempo estrictamente necesario para finalizar cada una de las actividades mediante el uso de calendarios adecuados de proyecto y recursos⁷.

2.1 ESTIMACIÓN DE DURACIÓN DE LAS ACTIVIDADES SEGÚN PMI

Para llegar a una apropiada estimación de duraciones que apoye la realización de cronogramas, se hace necesario establecer ciertas entradas básicas relacionadas con el alcance del proyecto⁸.

2.1.1 Plan de gestión del cronograma. Es el enunciado textual y documental que permite reconocer los criterios y las actividades para desarrollar y llevar control del cronograma.

2.1.2 Lista de actividades. Procedimiento en el que se documentan las acciones o actividades a través de una lista exhaustiva con su respectiva identificación y descripción del alcance, que permita comprender el trabajo a realizar.

2.1.3 Atributos de las actividades. Añaden una descripción detallada a las variables asociadas a cada actividad.

⁶ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, “Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía de PMBOK),” Pensilvania: Newtown Square, 2013, p. 51-56.

⁷ Ibid., p.51.

⁸ Ibid., p.51.

2.1.4 Recursos requeridos para las actividades. En este proceso se estima la cantidad y tipo de material, personal y equipo que se requiere para cada actividad. Identifica los distintos requisitos de cada recurso a asignar, con su disponibilidad y la cantidad necesaria para desarrollar las actividades.

2.1.5 Calendarios de recursos. Identifica los parámetros asociados a la disponibilidad del recurso, sobre los días y turnos de trabajo. Este proceso se lleva a lo largo de cada una de las etapas del proyecto por medio de la aplicación de algunas herramientas y técnicas.

2.2 TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE DURACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Estas son algunas de las técnicas empleadas para estimar de forma más precisa las duraciones de tiempo de trabajo en obra necesario para la ejecución de cada actividad presente en el proyecto.

2.2.1 Juicio de expertos (JE). Se categoriza como la técnica más empleada en las diez áreas del conocimiento, siendo cinco veces más frecuente que la siguiente más común⁹. Con base en la experiencia de uno o varios expertos, se suministran bases de datos de información respecto a duraciones recomendadas derivadas de proyectos previos, sin embargo, las cortas definiciones y la carencia de explicación de su correcta aplicación muestra susceptibles resultados sobre las estimaciones¹⁰.

2.2.2 Estimación análoga (EA). Se considera como la técnica de estimación menos costosa y de mayor facilidad de implementación ya que exige menor tiempo. Se basa en estimar las duraciones de las actividades de un proyecto por medio de la utilización de datos históricos similares de proyectos anteriores¹¹. Expertos

⁹ SZWED, Paul. "Expert Judgment in Project Management: Narrowing the Theory-Practice Gap," in *Project Management Institute, Inc*, Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2016. p.4-5.

¹⁰ Ibid., p.4.

¹¹ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. 2013. Op cit., p.51.

advierten sobre la implementación negativa de la técnica en proyectos que requieren mayor precisión¹².

2.2.3 Estimación paramétrica (EP). Técnica soportada en relaciones estadísticas entre datos históricos y variables propias de los proyectos que con una mayor sofisticación y datos de proyectos similares al de interés, permite estimaciones con mayor exactitud. Posee la facilidad de trabajar en conjunto con otras técnicas¹³.

2.2.4 Estimación por tres valores o método PERT (Técnicas de Revisión y Evaluación de programas). Se conoce como un modelo probabilístico o estocástico que incluye como variable la incertidumbre en la estimación de las duraciones de las actividades, implementando tres estimaciones de tiempos^{14 15}.

2.2.4.1 Estimación de tiempo más probable (tM). Se basa en duraciones que más se acerquen a las expectativas realistas del proyecto, es decir, el mejor tiempo.

2.2.4.2 Estimación de tiempo optimista (tO). Duraciones que se enmarcan en el mejor contexto posible. Se considera la mínima duración probable.

2.2.4.3 Estimación de tiempo pesimista (tP). Se basa en el análisis de las duraciones en el peor escenario posible de la actividad. Considerada la máxima duración probable.

Como resultado se determina el tiempo esperado (tE), por medio del promedio ponderado que se mide a partir de la distribución triangular Ecuación (1) o mediante la distribución beta Ecuación (2).

¹² JACKSON, Michelle Bowles. Estimates are just that. *PM Network*. 2012, vol. 6 no. 98, pp. 56-64.

¹³ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. 2013. Op cit. p. 141-192.

¹⁴ Ibid., p.141.

[1]¹⁵ AACE INTERNATIONAL. 32R-04: Determining Activity Durations. *Revista AACE International*. 2012, vol. 2 no. 32, pp. 1-16.

$$tE = \frac{tO + tM + tP}{3} \quad (1)$$

$$tE = \frac{tO + 4tM + tP}{6} \quad (2)$$

Cabe mencionar, que estas son algunas de las técnicas más utilizadas para la estimación de duraciones, sin embargo, existen demás técnicas que no son ajenas a este proceso, como lo es el caso de las técnicas grupales de toma de decisiones, análisis de reservas, estimación ascendente (Bottom up) y estimación usando rangos de duraciones¹⁶.

2.3 PUENTE EN CONCRETO REFORZADO

Los puentes como estructuras lineales y de sostén pueden clasificarse como aporticados, de arco, reticulados, colgantes, atirantados y tipo viga, siendo este último el eje principal de estudio. Generalmente los elementos que los conforman son las losas que tienen como fin transmitir la carga a las vigas las cuales presentan varios tipos de secciones transversales (rectangular, I, T y cajón) y los estribos y pilares (con cimentaciones superficiales o profundas) que son los encargados de soportar las vigas y las losas, a través de un sistema de apoyos y juntas¹⁷.

2.3.1 Creación de EDT para construcción de puentes. Las actividades necesarias para la realización de cada uno de los elementos estructurales de un puente en concreto se pueden agrupar en paquetes de trabajo, siendo estos el nivel más bajo de la estructura de desglose del trabajo (EDT) y en donde se encuentra la base para la estimación de costos y duración de un proyecto¹⁸, dentro de estos paquetes en puentes destacan aquellos asociados a los recursos de concreto y acero empleados en la investigación, así como estribos y aletas, apoyos de

¹⁶ RODRÍGUEZ, Emilio Enrique. "Análisis de metodologías de estimación de duración de actividades en proyectos de ingeniería civil,". Tesis de Pregrado. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. 2016. 144p.

¹⁷ SEMINARIO, Manrique Ernesto. Guía para el diseño de puentes con vigas y losas. Tesis de Pregrado. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil, 2004. 225p.

¹⁸ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. 2013. Op cit. p. 126-128.

neopreno, vigas postensadas, riostras, tableros, losas de aproximación y barreras de tráfico, entre otros. La EDT de un puente puede venir acompañada por actividades de excavación, relleno u obras de drenaje.

2.4 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP)

Con el fin de realizar un análisis cualitativo se busca dentro de los distintos modelos de selección aquel que facilite la escogencia de diversas opciones dentro de un proyecto, en donde el método AHP es un modelo matemático basado en comparaciones a pares que, de forma eficiente y gráfica, permite llevar un orden sobre la información encontrada referente a un problema de decisión, dividiendo la información en una jerarquía básica conformada por el objetivo general, los criterios y las alternativas¹⁹, siendo el más utilizado en los proyectos de construcción debido a su sencillez en la aplicación y flexibilidad al momento de tomar una decisión en un proceso de selección²⁰. AHP ha sido aplicado en diversos contextos como el de la contratación, las adquisiciones públicas, la gestión de activos, la vivienda pública, la infraestructura urbana, energía, prácticas de vía rápida, edificios públicos, dotación de personal, ejecución de proyectos y solución de controversias²¹.

2.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS

Una vez definido el alcance es de gran importancia conocer el costo estimado del proyecto para su inicio y ejecución, siendo este una aproximación monetaria basada en información disponible en un determinado instante de tiempo para cada uno de

¹⁹ SALAS, Julio; LEYVA, Máximo y CALENZANI, Adolfo. "Modelo del proceso jerárquico analítico para optimizar la localización de una planta industrial." *Revista Industrial Data*. 2014, vol. 17, no. 2, pp. 112–119.

²⁰ MAYOR, Julián; BOTERO, Sergio y GONZALEZ, Juan. "Modelo de decisión multicriterio difuso para la selección de contratistas en proyectos de infraestructura: caso Colombia," *Revista Obras por Impuestos*. 2016, no. 20, pp. 56–74.

²¹ KHALIFA Rafa y DAIM, Tugrul. "Project Assessment Tools Evaluation and Selection Using the Hierarchical Decision Modeling: Case of State Departments of Transportation in the United States," *Journal of Management in Engineering*. 2020, vol. 37, no. 1, p.p.23 doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000858.

los recursos asignados en las actividades del proyecto²².

En el proceso de elaborar un presupuesto adecuado, en ocasiones resulta ser una tarea compleja debido a los factores que se le atribuye, tales como la magnitud del proyecto, la variedad de los materiales empleados y los variables precios de los recursos, entre otros. Sin embargo, es posible obtener un presupuesto teniendo como base las cantidades de obra y los análisis de precios unitarios (APU), que establecen las tareas presentes en el cronograma de obra y los recursos que estas incluyen²³.

2.6 VALOR DEL DINERO EN EL TIEMPO

Para efectos del cálculo del presupuesto del proyecto ajustado al año de ejecución se hace necesario el uso del concepto de valor en el tiempo, el cual muestra una variación del valor de una cantidad determinada la cual puede presentar una depreciación o apreciación en el tiempo tomando como referencia el tiempo presente.

En el sector de la construcción se encuentra el índice de costos de la construcción pesada (ICCP) suministrado mes a mes por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), donde se conocen las variaciones de precios de los distintos insumos usados en la construcción de carreteras y puentes en Colombia²⁴. A través del uso de este indicador se facilita la realización de ajustes de precios en la construcción mediante distintas metodologías como la propuesta por INVIAS en su manual para interventoría en obras públicas Ecuación (3) y el uso de la Ecuación (4) de interés compuesto utilizado comúnmente en matemáticas

²² PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. 2013. Op cit. p. 192-226.

²³ PORRAS, Hector, *et al.* "Tecnologías 'Building Information Modeling' en la elaboración de presupuestos de construcción de estructuras en concreto reforzado," *Revista Entramado*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 230–249, 2015, doi: 10.18041/entramado.2015v11n1.21116.

²⁴ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (Índice de costos de la construcción pesada (ICCP)), [Sitio web]. Bogotá: MINITRABAJO. [Consulta: 8 de octubre 2020]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/indice-de-costos-de-la-construccion-pesada>

financieras²⁵, en función de la variación mensual del ICCP de los meses de interés.

$$V_a = V_{ps} \frac{I_a}{I_{ps}} \quad (3)$$

Donde V_{ps} corresponde al valor pasado ajustado, I_a al ICCP del mes actual, I_{ps} al ICCP del año de contratación del proyecto, V_a valor actual.

$$V_a = V_{ps}(1+i)^n \quad (4)$$

Donde V_{ps} corresponde al valor pasado ajustado, i a la variación promedio del ICCP de los meses implicados y n el número de meses entre el valor actual y el pasado.

²⁵ KOZIKOWSKI, Zbigniew. "Matemáticas financieras El valor del dinero en el tiempo," México: McGraw Hill Interamericana, 2007. pp. 62-65.

3. ESTIMACIÓN EN LA PLANIFICACIÓN DEL PUENTE

La presencia de retrasos en la construcción de gran parte de los puentes en Colombia²⁶ da lugar a centrar la investigación en el análisis de las herramientas de estimación de duraciones aplicadas en el contexto de los puentes que permita comparar los tiempos de planificación con los tiempos de ejecución.

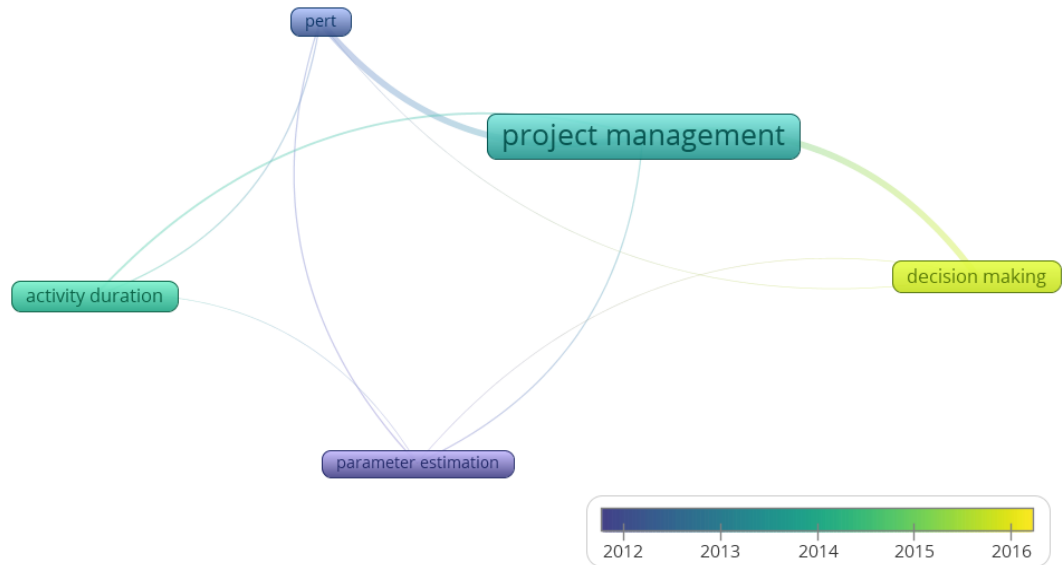
3.1 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LAS TÉCNICAS

Se realiza una breve revisión de la influencia de varios de los conceptos relacionados a la gestión de proyectos, con enfoque en la planeación y estimación de las duraciones de actividades en el ámbito académico internacional, mediante el uso de la herramienta para estudios bibliométricos SCOPUS que brinda información de publicaciones actuales de diversos autores. En los últimos 20 años se presenta un interés de los investigadores por abarcar estudios en el área de ingeniería referentes a conceptos tales como estimación, actividades, duraciones, construcción y herramientas (palabras usadas para la búsqueda).

Al analizar los resultados de la búsqueda por medio de la herramienta de construcción y visualización de redes bibliométricas (VosViewer) y tomando como referencia la ocurrencia de las palabras claves de interés respecto a un total de 407 documentos, se interpreta que la mayoría de las investigaciones se centran en tratar las herramientas de estimación paramétrica (7 ocurrencias), PERT (15 ocurrencias), y toma de decisiones (24 ocurrencias). Además, para los años más cercanos a la actualidad las herramientas que llevan incluido la toma de decisiones son las más investigadas como se muestra en la figura 2.

²⁶ MINISTERIO DE TRANSPORTE. 2020. Op cit. pp. 1.

Figura 2. Red de análisis bibliométrico restringiendo las palabras relacionadas con las herramientas de estimación de duraciones



Fuente: VISUALIZING SCIENTIFIC LANDSCAPES. Consulta biométrica. [Sitio web]. VOSviewer. [Consulta: 20 de octubre 2020]. Disponible en: <https://www.vosviewer.com/>

Posteriormente, se hizo una revisión de las tesis de ingeniería y proyectos enfocados en procesos de gestión en puentes, en donde se aplica alguna de las técnicas para estimación de duraciones y alguna técnica de seguimiento y control de costos detallada que permitiera identificar los problemas asociados a la herramienta, enfocados en los recursos de mano de obra y equipos. Para ello, se elabora un registro de datos recopilando documentos de proyectos de puentes vehiculares a través de bases de literatura académica, en donde el criterio de selección de dichos proyectos a revisar se basó en identificar en cada uno, la metodología propuesta por el PMI para la gestión de proyectos que evidencien la presencia de la gestión del tiempo en la planeación, además de los criterios inicialmente mencionados, así como las conclusiones propias que generan los autores.

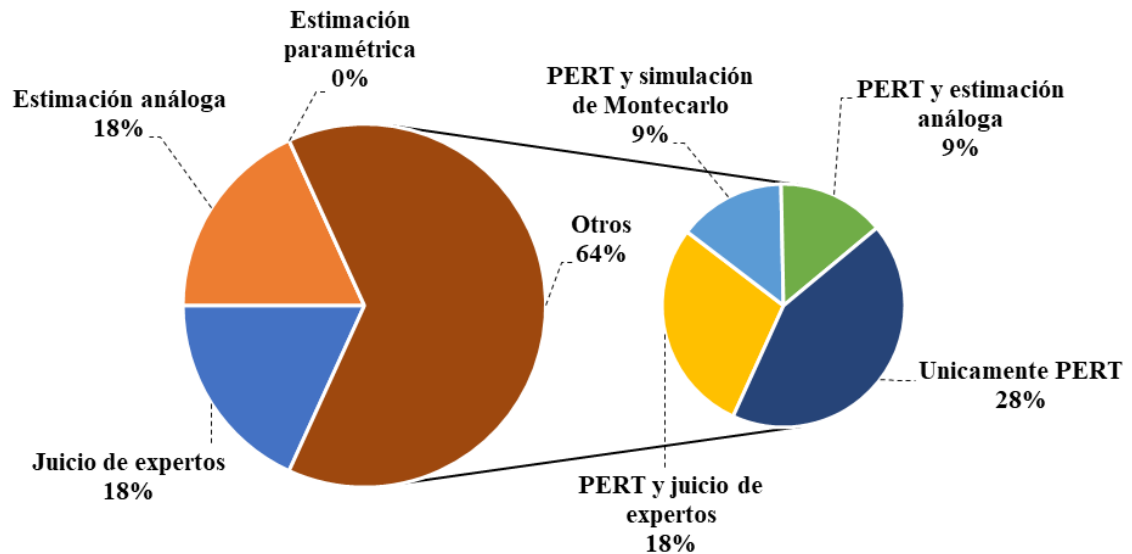
En la búsqueda de estos documentos se identificaron un total de 11 tesis de investigación en las cuales se pudo observar los factores de interés para este trabajo. En la figura 3 se puede ver la importancia del uso de la técnica PERT para la estimación de duraciones de forma generalizada (64% de uso), del mismo modo, evidencia la gran capacidad de asociación que posee en conjunto con las otras técnicas para la estimación de tiempos en la etapa de planeación dentro del ciclo de vida del proyecto. De igual manera, se resalta la utilización de la estimación análoga y del criterio de expertos para la obtención de tiempos. Esta última, presenta grandes inconvenientes en la etapa de planeación reflejados en el seguimiento y control según Serpa²⁷ y Rocha²⁸.

Dentro del marco de las herramientas de estudio, se encontró que el recurso de mano de obra es uno de los factores que más afecta las duraciones de los proyectos. El cumplimiento del rendimiento de los obreros es vital para obedecer al seguimiento de la línea base del proyecto y no sobrepasar lo planificado. Los rendimientos de mano de obra se encuentran sujetos a factores de gran influencia que pueden afectarlos de manera tanto positiva como negativa, la eficiencia de este recurso se puede enmarcar dentro de un rango que va del 0% cuando no se realiza nada hasta un 100%, en donde se alcanza los valores teóricos planeados. Para el caso de esta investigación se asume que los rendimientos de mano de obra para estimaciones promedio y optimistas de tiempo son basados en datos de uso frecuente como INVIAS u otros enlaces de bases de datos y no se explora su veracidad.

²⁷ SERPA. 2015. Op Cit. p.279.

²⁸ ROCHA. 2018. Op Cit. p.225.

Figura 3. Registro de datos de proyectos asociados a las técnicas de estimación



Fuente: Elaboración propia.

3.2 FACTORES DE IMPACTO EN LA HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN

En la dirección de proyectos es relevante la intención de conseguir la mayor aproximación posible sobre los tiempos que demorarán en ejecutarse cada una de las actividades, ya que una correcta planeación de la gestión del tiempo cierra eventuales brechas en el cronograma y los costos del proyecto en obra. No obstante, el logro de alcanzar un 100% de eficiencia sobre los rendimientos para la obtención de esos tiempos en obra resulta ser una tarea difícil, por lo que la labor de los directores de proyecto, mediante el uso de las técnicas de estimación más adecuadas, es reducir al máximo la variabilidad de lo planeado con lo ejecutado.

Por medio del registro de datos fue posible clasificar algunos de los problemas o falencias más comunes, asociadas a las distintas técnicas con la ayuda de las herramientas de control y monitoreo que entregan los autores para llevar seguimiento de los costos y tiempos del proyecto.

En la tabla 1 se realiza un registro de las falencias más comunes encontradas y que indican la necesidad de considerar tiempos pesimistas en el cálculo de cronogramas de ejecución de proyectos. También se aprecia la incidencia de problemas de ejecución en la elaboración de los cronogramas, que pueden ir desde procesos administrativos hasta los más frecuentes en la etapa de ejecución del proyecto.

Tabla 1. Falencias más comunes clasificadas dentro proyectos de puentes asociados a la herramienta de estimación

Ítem	Problema asociado	Referencia
P1	Fallas en recurso equipo (rendimiento de los carros de avance)	Rocha ²⁹
P2	Sobrestimación de obreros en obras de excavación manual	Vásquez ³⁰
P3	Mano de obra no calificada para realizar labores con bajos rendimientos	Vásquez ³¹ , Olaya ³²
P4	Inasistencia injustificada de obreros	Vásquez ³³
P5	Retrasos asociados a la cimentación (Subestimaciones de recursos)	Hernández ³⁴ , Velazco ³⁵

²⁹ ROCHA. 2018. Op Cit. p.225.

³⁰ VÁSQUEZ, Franco Dante. "Planificación y Control en el Desarrollo de la Construcción del Puente Carretero con la Aplicación Last Planner en la Provincia Huari – Áncash," Tesis de Pregrado. Lima: Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería. Administración y Seguridad en la Construcción, 2018. p.178.

³¹ Ibid., p.178

³² OLAYA. 2018. Op cit. p.112.

³³ VÁSQUEZ. 2018. Op cit. p.178.

³⁴ HERNÁNDEZ, Miguel Angel y TORRES, Ana Maria. Implementación y puesta en marcha del proyecto para la ampliación del Puente de la Caro," Tesis de Especialización. Bogota: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2018. 236p.

³⁵ VELAZCO, Freddy Marcelo. Gestión de tiempo, comunicación y riesgos, en la construcción de la cimentación profunda; pilotaje del estribo 2, pilares 4 y pilares 3 del Puente Chilina - Arequipa, Aplicando los fundamentos de la guía de dirección de proyectos difundidos por el Project. Tesis de Especialización. Arequipa: Universidad Católica Santa María. Facultad de arquitectura e ingeniería civil y del ambiente. Programa de ingeria civil, 2013. 226p.

Tabla 1. (Continuación)

P6	Adquisición de predios y falta de firmas para acompañamiento de especialista en suelos	Olaya ³⁶ , Hanco ³⁷
P7	Retrasos en estudios y diseños de tránsito y tráfico	Pacheco ³⁸
P8	Mayores cantidades de obra de las programadas (falta de mano de obra)	Blanco ³⁹
P9	Programar sobretiempos en la mano de obra	Maria ⁴⁰
P10	Pagar fletes para adelantar materiales atrasados	Maira ⁴¹ , Serpa ⁴²
P11	Subestimación de tiempos con opciones de incidencia bajos	Vergel ⁴³
P12	Supuestos iniciales incumplidos (Huelgas por sindicatos, malestar de pobladores por las obras)	Serpa ⁴⁴

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Evaluación de incidencia. Como criterio de evaluación de la herramienta o técnica para la estimación de duraciones y con el fin de dar una participación a cada una de ellas, de tal forma que permita establecer cuál es la más adecuada y conveniente para los proyectos de puentes, se propone un método de evaluación basado en un Proceso Analítico Jerárquico (en inglés Analytic Hierarchy Process

³⁶ OLAYA. 2018. Op cit. p.112.

³⁷ HANCCO, Henry *et al.* Implementación del Last Planner y la metodología del valor ganado en proyectos civiles construcción de puentes red vial 5 – Huacho. Tesis de Maestría. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Programa de maestría en dirección de la construcción, 2019. 108p.

³⁸ PACHECO, Antonio Fair. “Estudios, diseños y construcción del puente sobre el Río Lebrija en el corregimiento de Terraplén en el municipio de San Martín - Cesar,” Tesis de Especialización. Bogota: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2019. 286p.

³⁹ BLANCO, Laura y RAMÍREZ Jaramillo, “Aplicación del método de valor ganado en un proyecto de construcción caso de aplicación: Construcción de un puente vehicular. Tesis de Especialización. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2013. 225p.

⁴⁰ MARÍA. 2018. Op cit. p.145.

⁴¹ Ibid., p.145.

⁴² SERPA. 2015. Op cit. p.279.

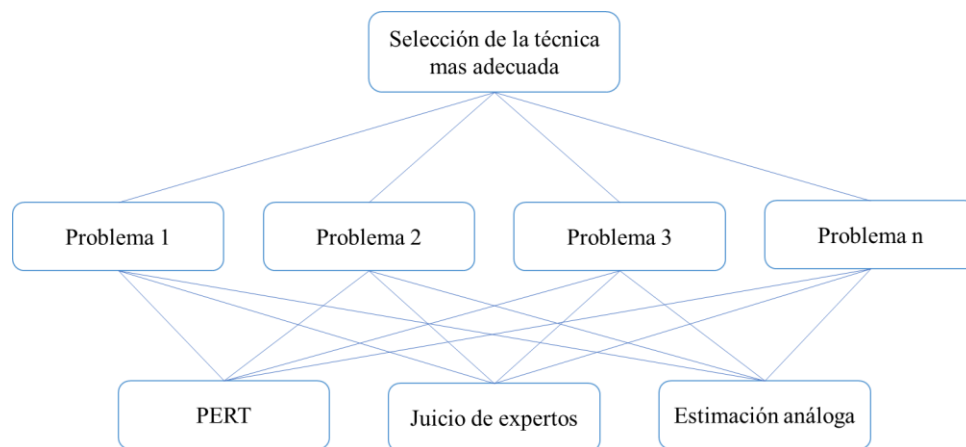
⁴³ VERBEL, Harol. Análisis cuantitativo de riesgos constructivos en puentes bajo la metodología del PMI caso de estudio: Puente Barú, Cartagena - Bolívar. Tesis de Pregrado. Cartagena: Universidad de Cartagena. Facultad de ingeniería civil. 2014. 86p.

⁴⁴ SERPA. 2015. Op cit. p.279.

(AHP)).

Inicialmente, se muestra una jerarquización del modelo identificando y asociando el objetivo, los problemas y las técnicas a evaluar como se observa en la figura 4. Las técnicas de PERT, Juicio de expertos y Estimación Análoga se relacionan con los problemas a través del impacto que generan en los proyectos, con el fin de poder lograr el objetivo que es seleccionar la técnica más adecuada.

Figura 4. Estructura de análisis jerárquico adaptado al caso



Fuente: Elaboración propia.

Para la aplicación del modelo fue necesario establecer un peso a cada uno de los problemas, tomando como base la escala de Saaty de la tabla 2 y como criterio de calificación el grado impacto que tenía el problema sobre el proyecto en términos de costos y tiempos, valorados en función de los índices arrojados por la aplicación de una técnica de seguimiento y control como el valor ganado que estima la relación del valor ejecutado en contraste con el costo real y el planeado inicialmente. Cabe aclarar que cada problema debe tener un peso para que al comparar sea posible establecer cual problema tiene más impacto sobre el otro, esto resulta de la simple diferencia de los pesos de los problemas.

Las tres técnicas evaluadas también deben ser comparadas entre sí bajo la condición de cada problema. El criterio de comparación se basaba en identificar si la técnica se encontraba asociada al problema, bajo las referencias incluidas en la tabla 1. En síntesis, todo lo anterior se puede visualizar en la tabla 3, donde JE identifica Juicio de Expertos y EA identifica Estimación Análoga.

Tabla 2. Escala de impacto de AHP

Juicio sobre la preferencia	Tasa numérica
Extremadamente más impactado	9
De muy fuertemente a extremadamente impactado	8
Muy fuertemente impactado	7
De fuertemente a muy fuertemente más impactado	6
Fuertemente más impactado	5
De moderadamente a poderosamente más impactado	4
Moderadamente impactado	3
Igual a moderadamente más impactado	2
Igual impactados	1

Fuente: SAATY, Tomas. Transport planning with multiple criteria: the analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of Advanced Transportation*. 1995, 29(1), pp. 81-126.

Tabla 3. Pesos asociados al problema y técnicas presentes en cada uno

ITEM	TÉCNICA	PESO
P1	PERT, JE	6
P2	EA	3
P3	EA, PERT	4
P4	EA	3
P5	PERT, JE,	3
P6	PERT	4
P7	PERT	2
P8	-	3
P9	EA	4
P10	EA, JE	4
P11	PERT	3
P12	JE	6

Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificados los criterios de la evaluación, tanto de los problemas encontrados como de las alternativas, se procede a aplicar el modelo matemático del AHP con la finalidad de encontrar la técnica de mayor peso según la información bibliográfica encontrada.

Se realiza la integración de distintas matrices de comparación para poder relacionarlas entre sí como las mostradas en la Ecuación 5, en donde cada matriz posee la característica de su diagonal principal con un valor de 1 relacionada con una importancia relativa de sí misma de un 100%, además son simétricas y cada elemento contiene el inverso multiplicativo de su simétrico Ecuación⁴⁵.

$$\begin{array}{c|ccc} \text{Var(s)} & P_1 & P_2 & P_3 \\ \hline P_1 & 1 & a_{12} & 1/a_{31} \\ P_2 & 1/a_{12} & 1 & a_{23} \\ P_3 & a_{31} & 1/a_{23} & 1 \end{array} \quad (5)$$

Estas características están presentes en cada uno de los niveles jerárquicos de la estructura de análisis, en donde una vez ensamblada la matriz se procede a realizar su normalización a través de la suma de cada una de sus columnas como se muestra en la Ecuación (6). Una vez obtenido este valor se debe realizar la división de los elementos de la matriz sobre su respectiva suma como se resuelve en la Ecuación (7).

$$S_n = \sum_{i=1}^n a_i \quad (6)$$

$$\begin{array}{c|ccc} \text{Var(s)} & P_1 & P_2 & P_3 \\ \hline P_1 & a_{11}/S_1 & a_{12}/S_2 & a_{13}/S_3 \\ P_2 & a_{21}/S_1 & a_{22}/S_2 & a_{23}/S_3 \\ P_3 & a_{31}/S_1 & a_{32}/S_2 & a_{33}/S_3 \end{array} \quad (7)$$

Ya definida la matriz normalizada, se calculan los valores promedios de las filas con la intención de conformar el vector de prioridades como se observa en la Ecuación (8).

⁴⁵ MAYOR. 2016. Op cit. p. 56–74.

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \times \sum_1^n a_{1j} \\ \frac{1}{n} \times \sum_1^n a_{2j} \\ \frac{1}{n} \times \sum_1^n a_{3j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pr_1 \\ Pr_2 \\ Pr_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Una vez conseguidos los vectores criterio tanto de las técnicas como de los problemas encontrados, siguiendo cada una de las ecuaciones anteriores, podemos agrupar la matriz que permitirá reconocer la técnica a seleccionar, la cual se encuentra conformada por los vectores de prioridades de las técnicas asociadas a cada uno de los problemas Matriz (9). Para calcular la probabilidad de impacto se realiza la multiplicación entre la Matriz (9) y el vector de criterios asociados a los problemas Ecuación (10). Como resultado se puede interpretar que la menor probabilidad es la técnica más adecuada, lo que indica que el AHP permite tomar decisiones a partir de datos con un enfoque cualitativo, que en el caso de esta investigación eran problemas asociados a las técnicas.

$$\begin{array}{ccccc} \text{Var(s)} & P_1 & P_2 & P_3 & \\ P_1 & \begin{bmatrix} Pr_{1(PERT)} & Pr_{1(PERT)} & Pr_{1(PERT)} \end{bmatrix} & & & \\ P_2 & \begin{bmatrix} Pr_{2(JE)} & Pr_{2(JE)} & Pr_{2(JE)} \end{bmatrix} & & & \\ P_3 & \begin{bmatrix} Pr_{3(EA)} & Pr_{3(EA)} & Pr_{3(EA)} \end{bmatrix} & & & \end{array} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} Pr_{1(PERT)} & Pr_{1(PERT)} & Pr_{1(PERT)} \\ Pr_{2(JE)} & Pr_{2(JE)} & Pr_{2(JE)} \\ Pr_{3(EA)} & Pr_{3(EA)} & Pr_{3(EA)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Pr_1 \\ Pr_2 \\ Pr_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Por medio del método de selección se identifican la EA seguida de la PERT como las técnicas mejor calificadas, usando como base una revisión bibliográfica y un análisis con criterios cualitativos (Anexo A). Sin embargo, la duda ocasionada por la falta de uniformidad sobre documentación encontrada para cada una de las técnicas genera la necesidad de seguir estudiando las dos mejores herramientas destacadas por el modelo de análisis. Como consecuencia y con el fin de dar una mayor validez a la información, se considera pertinente cuantificar el problema aplicando las técnicas de Estimación Análoga (Fase 1) y PERT (Fase 2) en un proyecto de construcción enfocado en puentes, donde el proyecto base consiste en una obra de

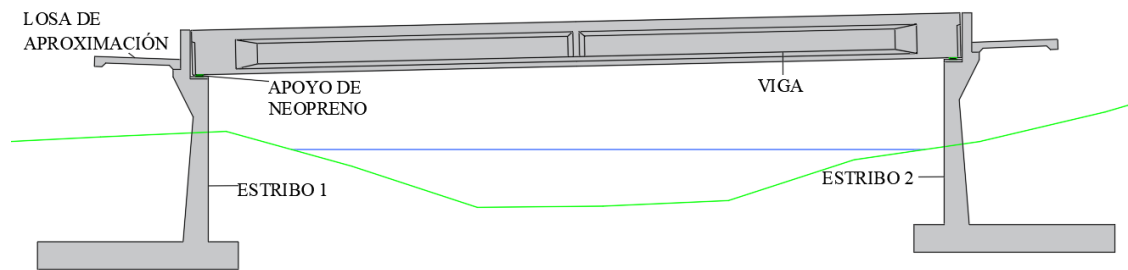
construcción ya ejecutada (Puente en concreto postensado con viga I).

3.3 APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS AL MODELO DE UN PUENTE TIPO

Esta etapa del estudio se enfoca en un proyecto de construcción tipo de un puente viga en concreto postensado diseñado bajo las normas del código colombiano de diseño sísmico de puentes (CCP-95), ubicado en la zona de Bucaramanga, Santander, el cual se ejecutó en el año 2015 a finales del primer trimestre. Se encuentra conformado por dos estribos que soportan la carga vehicular y el peso propio, 10 vigas postensadas de 30 metros de luz las cuales se fundieron in situ y posteriormente se izaron sobre los estribos como se observa en la figura 5; a su vez, las vigas reposan sobre apoyos de neopreno los cuales sirven como elementos de transferencia de carga a los estribos, además, posee riostras conectadas en los centros y extremos de las vigas. Todos estos en conjunto tienen la función de ser elementos de sostenimiento sobre los cuales se funden los tableros que están unidos entre sí por juntas de dilatación con desplazamientos máximos de 40 milímetros.

El tránsito vehicular accede mediante losas de aproximación a ambos extremos del puente y para la seguridad de los vehículos se cuenta con la presencia de barreras de tráfico ubicadas a los laterales del puente. Lo dicho hasta aquí supone que todo lo correspondiente a la estructura de pavimento, los movimientos de tierra y la red de alcantarillado no se tiene en cuenta.

Figura 5. Perfil longitudinal del puente tipo



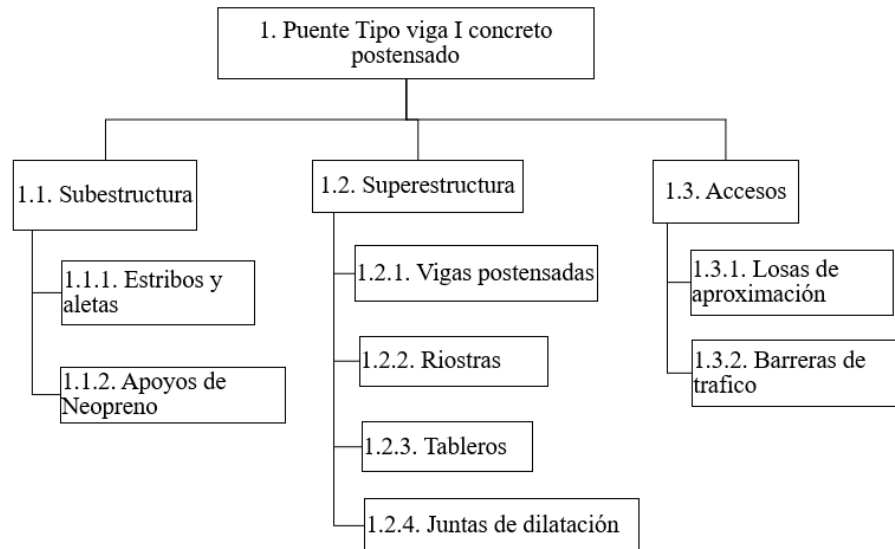
Fuente: Elaboración propia.

Para la aplicación de las herramientas de estimación de duraciones propuestas por el PMBOK y analizadas por el modelo AHP en el caso del puente, se hace necesario la implementación de un proceso de gestión de la triple restricción alcance-tiempo-cost, que tenga en cuenta ciertos supuestos que consisten en trabajar solo actividades relacionadas a elementos de concreto y acero, una obra totalmente excavada y los elementos estructurales correspondientes a estribos solados.

Se construye un enunciado base del alcance, una EDT (Figura 6) y un diccionario que conforman la línea base del alcance del proyecto (Anexo B). En estos se reflejan los paquetes de trabajo definidos con base en las características y supuestos de la obra.

Establecidos estos paquetes de trabajo surge la necesidad de definir los recursos necesarios para la ejecución de cada uno de ellos en el desarrollo del proyecto. Para esto se reconocen los insumos básicos utilizados en el proyecto a tratar como lo son los materiales, equipos y mano de obra y se le asignan a cada paquete de trabajo dentro del diccionario de la EDT.

Figura 6. EDT de proyecto tipo viga en concreto postensado



Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidos los recursos, se realiza un proceso de estimación de costos asociados, a través de cotizaciones y contactos comerciales. Estas cotizaciones son realizadas referentes al mes de septiembre del 2020 y llevadas a la fecha de referencia del 15 de marzo del 2015, mediante las metodologías de regresión de costos planteadas por Instituto Nacional De Vías ⁴⁶ y Kozikowski⁴⁷, siendo esta última la implementada en el estudio. Cada uno de los valores de ICCP mes a mes suministrados por el DANE⁴⁸ fueron usados como referencia para aplicar el método.

El proceso de gestión de costos es complementario al estudio de las técnicas de estimación de duraciones y tiene varias restricciones del caso para asegurar que los recursos asignados a la duración sean congruentes con el proyecto real. En la investigación se abarcaron los conceptos de planeación de gestión de los recursos

⁴⁶ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. 2013. Op cit. p.1.

⁴⁷ KOZIKOWSKI. 2007. Op Cit. p. 62-65.

⁴⁸ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. 2021. Op Cit. p. 62-65.

humanos, línea base del alcance y cronogramas para la estimación de los costos de cada uno de los paquetes de trabajo, con el fin de calcular el presupuesto del proyecto teniendo en cuenta las variaciones al realizar los cronogramas de la Fase 1 aplicando la Estimación Análoga y la Fase 2 utilizando la metodología PERT.

La planificación de la gestión de los costos no se realizó en este proyecto al no manejarse restricción en los costos asignados al proyecto, ya que esta estimación es de carácter investigativo, de igual forma el control de costos tampoco se realiza ya que el estudio tiene un enfoque objetivo desde la planificación y no de monitorear el estado actual de sus costos.

3.3.1 Duraciones de las actividades. Para estimar las duraciones de cada uno de los paquetes de trabajo presentes en una posible Estructura Desglosada de Trabajo EDT planteada en este estudio se requiere conocer la cantidad de recurso y estimar la cantidad de esfuerzo de trabajo. En esta investigación se hace necesario realizar las estimaciones de las duraciones en dos fases previamente mencionadas:

3.3.1.1 Estimación análoga (fase 1). Para realizar la estimación de duraciones mediante EA fue necesario el uso de proyectos y actividades similares analizadas en tesis de grado para llegar a estas duraciones, además de dividir los paquetes de trabajo en actividades base para ello, en la siguiente tabla 4 se identifica la desagregación de la EDT.

Tabla 4. Actividades base desagregadas de la EDT

ITEM	Tarea
1	Puente Tipo viga I concreto postensado
1.1	Subestructura
1.1.1	Estribos y aletas
1.1.1.1	Armado de acero de refuerzo 4200 kg/cm2 estribos y aletas con colocación de dados espaciadores 5cm
1.1.1.2	Encofrado formaleta metálica estribos y aletas
1.1.1.3	Vaciado y vibrado de concreto clase C estribos y aletas
1.1.1.4	Desencofrado de estribos y aletas
1.1.2	Apoyos de Neopreno
1.1.2.1	Suministración de mortero de nivelación
1.1.2.2	Limpieza y adecuación de superficie de estribo
1.1.2.3	Aplicación de película de resina epoxi con localización de ejes de apoyos e instalación de apoyos elastoméricos neopreno 60
1.2	Super estructura
1.2.1	Vigas postensadas
1.2.1.1	Suministro e instalación de solado
1.2.1.2	Armado de acero de refuerzo 4200 kg/cm2 viga postensada con Colocación de dados espaciadores 5cm
1.2.1.3	Colocación de acero de preesfuerzo 19000 kg/cm2 viga postensada
1.2.1.4	Encofrado y apuntalamiento de viga postensada
1.2.1.5	Vaciado y vibrado de concreta clase A viga postensada
1.2.1.6	Desencofrado de Vigas postensadas
1.2.1.7	Tensionamiento de acero de preesfuerzo
1.2.1.8	Izado de vigas postensadas
1.2.2	Riostras
1.2.2.1	Apuntalamiento de riostras
1.2.2.2	Encofrado formaleta riostra
1.2.2.3	Armado de acero de refuerzo 4200 kg/cm2 riostra
1.2.2.4	Vaciado y vibrado de concreto clase C riostra
1.2.2.5	Desencofrado de Riostras
1.2.3	Tableros
1.2.3.1	Apuntalamiento de tableros
1.2.3.2	Encofrado formaleta tableros
1.2.3.3	Armado de acero de refuerzo 4200 kg/cm2 Tableros
1.2.3.4	Vaciado y vibrado de concreto clase C tableros
1.2.3.5	Desencofrado de tableros
1.2.4	Juntas de dilatación
1.2.4.1	Limpieza y adecuación de superficie de junta
1.2.4.2	Perforación e instalación de pernos
1.2.4.3	Colocación juntas de dilatación VSL T40 y aplicación de resina epoxi
1.3	Accesos
1.3.1	Losas de aproximación
1.3.1.1	Suministro e instalación de solado
1.3.1.2	Encofrado formaleta de borde losas
1.3.1.3	Armado de acero de refuerzo 4200 kg/cm2 losas
1.3.1.4	Vaciado y vibrado concreto clase D losas de aproximación
1.3.1.5	Desencofrado de losas de aprox
1.3.2	Barreras de trafico
1.3.2.1	Armado de acero de refuerzo 4200 kg/cm2
1.3.2.2	Encofrado formaleta de borde
1.3.2.3	Vaciado y vibrado de concreto clase D
1.3.2.4	Desencofrado

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento consistía en identificar los rendimientos y recursos asignados a cada una de las actividades con el fin de llegar a la duración, que resultaba de la división de la cantidad de la actividad y el rendimiento encontrado. Las referencias de los rendimientos encontrados para algunas de las actividades de la Fase 1 se pueden visualizar en la tabla 5, los cuales se implementaron para la aplicación de la herramienta de estimación análoga ya que esta permite basarse en proyectos y actividades similares para estimar duraciones.

3.3.1.2 PERT (fase 2). Esta fase abarca la implementación de la estimación por PERT, donde se tuvieron en cuenta los tiempos encontrados en la tabla 5 para poder obtener uno de los tiempos necesarios para su aplicación. Sin embargo, fue necesaria la estimación de los tiempos faltantes para considerar dentro de los encontrados cuáles serían categorizados como tiempos optimistas, pesimistas y estimados, para ello se usaron bases de datos como las propuestas por INVIAS, entidades públicas encontradas en el SECOP II y la base de precios CYPE. Se selecciona arbitrariamente y por facilidad del estudio la distribución de ponderación triangular como base para la aplicación del método PERT.

Para ambas fases se utilizó el mismo proceso al momento de asignar los recursos o cuadrillas necesarias para desempeñar la actividad, esto con la intención de detallar de forma directa las distintas duraciones encontradas manteniendo la misma cantidad de mano de obra por tarea requerida.

3.3.2 Secuenciación de actividades y cronograma. Definidos los recursos y las duraciones de cada actividad, se realiza la secuenciación de actividades en concordancia al proceso constructivo del proyecto en sitio y la red lógica real implementada por el proyecto, el cual, ya fue ejecutado y tiene como base un amplio registro fotográfico del caso. Los cronogramas de las fases se detallan en el Anexo C.

La red lógica del proceso constructivo inicia desde la cimentación hasta la superestructura. Las actividades asociadas a los elementos de estribos en concreto

son el comienzo del proceso, en el cual, se inicia de forma paralela el suministro de solado para la construcción de las vigas en un sitio de obra (las vigas se funden aparte para luego transportarse al puente). Una vez terminados los estribos se instalan los apoyos de neopreno y las vigas (con sus acabados y debidamente tensionadas) se izan sobre estos para iniciar así el apuntalamiento de las riostras y posteriormente encofrarlas y apuntalar los tableros simultáneamente. La terminación de las riostras seguido de los tableros permite comenzar la instalación de las juntas de dilatación y al mismo tiempo avanzar en la construcción de las barreras de tráfico donde una vez acabadas se culmina con las losas de aproximación.

Tabla 5. Rendimientos encontrados en proyectos de investigación similares, (1x1 hace referencia a un 1 oficial y un ayudante)

Tarea	Cdlla (s)	Productividad	Referencia
Armado de acero de refuerzo 4200 kg/cm ²	1x1	33 kg/hr	Bernal ⁴⁹
Encontrado formaleta metálica estribos y aletas	1x1	12 m ² /día	Organización Internacional del Trabajo ⁵⁰
Vaciado y vibrado de concreto	2x8	4 m ³ /hr	Bernal ⁵¹
Desencofrado de estribos y aletas y losas	1x2	40 m ² /día	Organización Internacional del Trabajo ⁵²
Suministración de mortero de nivelación	1x1	1.25m ² /día	Servicio Nacional de Aprendizaje ⁵³
Colocación de apoyos con aplicación de resina	1x1	7.2 und/hr	CYPE INGENIEROS S.A ⁵⁴
Suministro e instalación de solado	1x2	4.2 m ³ /día	Correa ⁵⁵

⁴⁹ BERNAL, Tatiana. Posibles tipologías de puentes vehiculares para la ciudad de Bogotá. Tesis de Pregrado. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental, 2018. 225p.

⁵⁰ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO. "Rendimientos mínimos y promedios de mano de obra en Lima. Lima: OIT, 2003. p.1.

⁵¹ BERNAL. 2018. Op cit. p.225.

⁵² ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO. 2003. Op cit. p.1.

⁵³ SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Procesos. [Sitio web]. Bogotá: SENA. [Consulta: 8 de octubre 2020]. Disponible en: http://contratacion.sena.edu.co/_file/procesos/248_10.xls

⁵⁴ CYPE INGENIEROS S.A., "Generador de precios de la construcción Colombia." [Sitio web]. Bogotá: CYPE. [Consulta: 13 de noviembre 2020]. Disponible en: <http://www.colombia.generadordeprecios.info/>

⁵⁵ CORREA, Luisa y MENDOZA, Antonio. "Planificación del proyecto 'construcción de puentes en las

Tabla 5. (Continuación)

Colocación de acero de preesfuerzo 19000 kg/cm ²	1x2	60 kg/día	Delgado ⁵⁶
Encofrado y apuntalamiento para vigas postensadas y riostras	4x8	3.33 m ³ /hr	Del Castillo ⁵⁷
Desencofrado para Vigas postensadas, riostras y barreras	1x2	36 m ² /día	Organización Internacional del Trabajo ⁵⁸
Izado de vigas postensadas	1x2	3 und/día	Delgado ⁵⁹
Encofrado y apuntalamiento tableros	4x8	22.07 m ² /hr	Góngora ⁶⁰
Desencofrado de tableros	1x2	77 m ² /hr	Góngora ⁶¹
Encofrado de losas aprox	1x2	18 m ² /día	Organización Internacional del Trabajo ⁶²
Desencofrado de losas de aprox	1x2	40 m ² /día	Organización Internacional del Trabajo ⁶³
Encofrado de barreras de tráfico	1x1	27.69 m ² /hr	Organización Internacional del Trabajo ⁶⁴
Perforación e instalación de pernos	1x2	2.5 ml/hr	Del Rosario ⁶⁵
Colocación juntas de dilatación VSL T40	2x2	2.5 ml/hr	Del Rosario ⁶⁶

Fuente: Elaboración propia.

Esta secuencia de actividades en conjunto con la estimación de sus respectivas duraciones permite la elaboración de los cronogramas mediante el método de

vías rurales del Departamento del Guaviare' usando buenas prácticas del PMI establecidas en el PMBOK 5ed. Tesis de Especialización. Villavicencio: Universidad de los Llanos. Especialización en gerencia de proyectos, 2018. 225p.

⁵⁶ DELGADO, Cesar Alfonso y ZUÑIGA, Beny Rene. Comparación de costos entre puentes con viga de acero, concreto reforzado y postensado considerando la variación de la luz libre. Tesis de Pregrado. Cartagena: Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería civil. 2015. 82p.

⁵⁷ DEL CASTILLO, Javier. Recomendaciones para la selección de tipo de superestructura de puentes en Colombia. Tesis de Pregrado. Bogota: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 2011. 128p.

⁵⁸ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO. 2003. Op cit. p.1.

⁵⁹ DELGADO 2015. Op Cit. p.82.

⁶⁰ GÓNGORA, Robert y LÓPEZ, Richard. "Rendimientos de mano de obra para los diferentes sistemas constructivos de placas entrepiso aligeradas aplicadas en la ingeniería civil en la región. Tesis de Pregrado. Girardot: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 2020. 102p.

⁶¹ Ibid.

⁶² ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO. 2003. Op cit. p.1.

⁶³ Ibid.

⁶⁴ Ibid.

⁶⁵ DEL ROSARIO, Pamela. "Planeación y programación del proyecto construcción del puente la quebrada Jardín del Condor aplicando CPM Microsoft Project Gantt Excel. Tesis de Pregrado. Machala: Universidad Técnica de Machala. Unidad Academica de Ingeniería Civil, 2016. 56p.

⁶⁶ Ibid.

diagramación por precedencia PDM, en donde cada actividad tendrá una dependencia predecesora o sucesora dentro de la red lógica. Esta metodología permite elaborar un modelo que facilita calcular el momento en que se debe ejecutar una respectiva actividad⁶⁷.

En el presente estudio se realizaron cronogramas distintos por cada una de las fases enunciadas (Anexo C) manteniendo en estos las dependencias entre las actividades y variando únicamente las duraciones encontradas. Esto arroja una duración total para el proyecto de 321 días por PERT y 294 días implementando la EA.

3.3.3 Determinación del Presupuesto del proyecto. Posterior a la estimación de duraciones y determinación del cronograma, los insumos asociados al proyecto generan un costo, reflejado en los análisis de precios unitarios que proporcionan los costos directos de un proyecto, siendo la suma de estos el total de costos a manejar en el desarrollo del proyecto.

Cada una de las fases en función de sus respectivos cronogramas y la línea base del alcance permitieron la elaboración de los presupuestos para la fase 1 y para la fase 2 (Anexo D y E), los cuales, mantienen entre si las cantidades y costos de los distintos materiales, alquiler de equipos por día y el valor por jornal con prestaciones de cada una de las personas implicadas en el proyecto. Los distintos costos de estos insumos fueron estimados mediante cotizaciones realizadas sobre las distintas ofertas del mercado de los proveedores calificados.

Cabe resaltar que para la elaboración de cada uno de los presupuestos de las fases se tuvieron en cuenta únicamente los costos directos del proyecto sin tener en cuenta aquellos generados referentes a la administración, imprevistos y utilidades (AIU) del proyecto.

⁶⁷ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. 2013. Op cit. p.51-56.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 ESTUDIO DE LA RELEVANCIA EN LAS TÉCNICAS

Una vez obtenidos los registros de las tesis encontradas y revisadas de las técnicas que más se investigan, es posible dar un panorama general de las herramientas de estimación en comparación con Latinoamérica. Se puede visualizar que la mayoría de los investigadores centran sus estudios en la aplicación de la herramienta PERT tomando esta como la más importante dentro del marco de las herramientas propuestas por el PMBOK.

La aplicación de PERT en los proyectos de investigación referentes a puentes es notable, los gestores de proyectos tienden aplicar esta herramienta debido a su aleatoriedad al introducir incertidumbre en la estimación de duraciones; tanto los estudios mundiales como las investigaciones latinoamericanas implementan la herramienta PERT y evidencian su capacidad de asociación con las demás herramientas de estimación. Los proyectos hacen uso de PERT en conjunto con herramientas de estimación análogas, incluso se ayudan de algunos expertos para estimar duraciones debido a que los gestores de proyectos dan un voto de confianza a sus expertos y agregan un grado de confiabilidad e incertidumbre a sus datos aplicando estimación por tres valores.

Se visualiza la importancia de la estimación paramétrica en diversos estudios del mundo, sin embargo, dentro de las tesis su ausencia prevalece por la dificultad de encontrar documentos que la implementen directamente en los proyectos de puentes, lo cual puede explicarse al ser una técnica más compleja para estimar con mayor uso de recursos asociados y tiempo de análisis⁶⁸.

Es importante destacar la variedad de técnicas encontradas en distintos procesos

⁶⁸ RODRÍGUEZ. 2016. Op cit. p.144.

de planeación de puentes ya que permiten apreciar la inquietud por explorar varias metodologías desde la planeación para estimar duraciones.

4.2 RESULTADOS DEL MÉTODO AHP

Para el proceso de selección de la técnica, se consideraron las tres formas de estimación de duraciones generales encontradas en los documentos tratados, siendo estas la metodología EA, JE y PERT. Una vez aplicado el método matricial descrito en función de los criterios establecidos en la tabla 2 y tabla 3 se encontró que las técnicas con mayor incidencia cualitativa y por consiguiente las más adecuadas son la EA y PERT debido a que arrojaron resultados positivos bajos de 29.17% y 33.66% respectivamente, mientras que la técnica más desfavorable resulta siendo la JE con 37.17% (Tabla 6).

Los resultados de esta selección podrían verse afectados por la cantidad de documentos que se encuentren en función de las técnicas implementadas. Sin embargo, el método cuenta con un índice de inconsistencia que al ser inferior a 0.1 se pueden considerar los resultados aceptables y consistentes⁶⁹, para este caso el resultado de cada una las matrices cumplen con este criterio, es decir, es aceptable (Anexo A).

Tabla 6. Resultados del método de selección AHP

TÉCNICA	CALIFICACIÓN
PERT	33,66%
JE	37,17%
EA	29,17%

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se mencionó anteriormente, el JE es una de las técnicas más implementadas dentro del campo de la estimación de duraciones. Sin embargo, esta no fue posible aplicarla en este estudio, debido a que resulta la menos favorecida

⁶⁹ MAYOR. 2016. Op cit. p. 56–74.

en el método de evaluación, además de ser susceptible a variaciones en los resultados⁷⁰ no se cuenta con criterios de expertos para aplicar esta técnica de estimación. Del mismo modo, es una técnica que presenta una menor precisión en comparación con la estimación análoga⁷¹.

4.3 EFECTO DE LAS TÉCNICAS APLICADAS

En el proceso de estimación de tiempos por cada una de las fases se encontraron variaciones que afectan de forma directa la construcción de cronogramas. Siguiendo los lineamientos de la sección anterior y tomando como referencia el tiempo base del proyecto (306 días) es posible hacer comparaciones entre las fases. Realizar esta comparación se resume en establecer diferencias en términos de duraciones finales, rutas críticas, variación en los recursos y costos finales.

El contraste de las técnicas en función de las duraciones es considerable pero aceptable según criterio de los investigadores. Para la fase 1 (EA) resulta una duración final de 294 días, lo cual se refleja en un 3.92% por debajo de lo real, mientras que la fase 2 (PERT) con una duración de 321 días presenta una variación de 4.9% por encima de lo real, lo cual se resume en una mayor precisión de la técnica EA aunque por los mayores tiempos que se asocian al desarrollo de la obra base de construcción no se alcanza a llegar al tiempo real, lo cual afecta negativamente el costo del proyecto.

Las diferencias de las técnicas por actividad en cada una de las fases, permite evidenciar que aquellas que poseen una menor complejidad como, por ejemplo, las que hacen referencia a los apoyos en neopreno y las juntas de dilatación, tienen tiempos que tienden a ser más cercanos y aquellas que poseen un mayor grado de dificultad presentan una brecha más amplia respecto a cada tiempo encontrado en las distintas fases del estudio. Esto se debe al manejo de distintos tiempos necesarios para implementar la metodología PERT, donde la opción de estimar

⁷⁰ SZWED. 2016. Op cit. p.4-5.

⁷¹ SEMINARIO. 2004. Op cit. p.225.

tiempos pesimistas y optimistas puede generar una alta variabilidad al momento de realizar la distribución. Sin embargo, estos son de ayuda ya que generan un rango de tiempos entre el cual se espera el desarrollo en obra de una actividad.

El método de ruta crítica permite identificar el camino más corto para la culminación del proyecto⁷² y analizando este en cada una de las fases, se puede inferir que su variabilidad depende de la secuenciación y duración de las actividades. La secuenciación es una variable que permanece constante en las fases y las duraciones de las actividades que no pertenecen a la ruta crítica, no representan un cambio tal que permita variar la misma.

La influencia de las técnicas de estimación en los recursos permite reconocer que la mano de obra y los equipos se encuentran directamente afectados por los tiempos finales de las actividades, lo que ocasiona que el presupuesto general en cada fase cambie. La variación en la cantidad de días que se necesita el personal y los equipos para terminar una actividad es directamente proporcional al costo del proyecto.

En términos de presupuesto las dos fases presentan variaciones sustanciales con los costos base del proyecto (presupuesto \$ 1.807.706.058). Por un lado, la fase 1 (EA) resulta un presupuesto total de \$ 1.729.883.770 con una variación de 4.31% por debajo de los costos bases, mientras que la fase 2 (PERT) con un presupuesto de \$ 1.761.635.298 varía en un 2.54% por debajo de lo real. Estas diferencias se pueden ver asociadas en primera instancia a la estimación de costos realizada en el estudio, sobre la cual no se profundiza al no ser el tema de enfoque de la investigación, pero si permite ver una proximidad por debajo del presupuesto base del proyecto, por lo que se determina que la fase 2 es la más cercana al costo base y que las estimaciones de duraciones no trasgreden en ningún costo, el costo del proyecto.

⁷² PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. 2013. Op cit. p.51-56.

Para una mejor comparación de los costos en función de los tiempos y apreciando la relación proporcional del presupuesto y la duración del proyecto, se puede considerar que tanto EA como PERT serían aceptables por sus diferencias de los cronogramas en sus respectivas fases, pero que la condición pesimista del PERT podría tener en cuenta afectaciones no determinísticas de los proyectos de construcción de puentes.

5. CONCLUSIONES

Apoyándose en los estudios anteriores realizados sobre las técnicas de estimación propuestas por el PMI aplicadas en paquetes de trabajo en proyectos asociados a puentes, fue posible constatar que en el análisis comparativo de las técnicas se permitió determinar la más adecuada. El modelo reconoce que la técnica de estimación de tiempos con mayor predominancia es EA con un 29.17%, al incluir la capacidad de asociación del estudio con proyectos anteriores similares corroborando que tiene una mayor precisión, pero demostrando que el resultado de este modelo puede ser sensible a la cantidad de problemas encontrados relacionados a las técnicas.

En términos cualitativos se determinó que la técnica EA es la más adecuada. Sin embargo, se debe reconocer que PERT es una de las técnicas que más se investiga y que más usan los gestores de proyectos por su capacidad de asociación con las demás técnicas. JE no se aplicó en el caso debido a que no se contaba con el equipo de expertos y se reconoce en la investigación como una técnica susceptible a variaciones y de menor precisión.

Se encontró en la aplicación de las técnicas que EA y PERT entregan duraciones cercanas al tiempo base, 3.92% por debajo y 4.9% por encima respectivamente. EA es la más acertada en tiempos del proyecto, ya que incluye una pequeña base de distintos proyectos anteriores y agrega una dispersión a los datos, no obstante, PERT, en función de tres estimaciones de tiempo que generan una estimación próxima a la duración del proyecto (teniendo en cuenta una mayor incertidumbre sobre los datos), permitió dar un costo más aproximado al ejecutado.

REFERENCIAS

AACE INTERNATIONAL. 32R-04: Determining Activity Durations. *Revista AACE International*. 2012, vol. 2 no. 32, pp. 1-16.

BERNAL, Tatiana. Posibles tipologías de puentes vehiculares para la ciudad de Bogotá. Tesis de Pregrado. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y ambiental, 2018. 225p.

BLANCO, Laura y RAMÍREZ Jaramillo, “Aplicación del método de valor ganado en un proyecto de construcción caso de aplicación: Construcción de un puente vehicular. Tesis de Especialización. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2013. 225p.

BOTERO, Luis Fernando. “Análisis de Rendimientos y consumos de mano de obra en actividades de construcción,” *Revista Universidad EAFIT*. 2002, vol. 38, nro. 128, pp. 9–21.

CORREA, Luisa y MENDOZA, Antonio. “Planificación del proyecto ‘construcción de puentes en las vías rurales del Departamento del Guaviare’ usando buenas prácticas del PMI establecidas en el PMBOK 5ed. Tesis de Especialización. Villavicencio: Universidad de los Llanos. Especialización en gerencia de proyectos, 2018. 225p.

CYPE INGENIEROS S.A., “Generador de precios de la construcción Colombia.” [Sitio web]. Bogotá: CYPE. [Consulta: 13 de octubre 2020]. Disponible en: <http://www.colombia.generadordeprecios.info/>

DEL CASTILLO, Javier. Recomendaciones para la selección de tipo de superestructura de puentes en Colombia. Tesis de Pregrado. Bogota: Universidad

de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 2011. 128p.

DEL ROSARIO, Pamela. “Planeación y programación del proyecto construcción del puente la quebrada Jardín del Condor aplicando CPM Microsoft Project Gantt Excel. Tesis de Pregrado. Machala: Universidad Técnica de Machala. Unidad Académica de Ingeniería Civil, 2016. 56p.

DELGADO, Cesar Alfonso y ZUÑIGA, Beny Rene. Comparación de costos entre puentes con viga de acero, concreto reforzado y postensado considerando la variación de la luz libre. Tesis de Pregrado. Cartagena: Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería civil. 2015. 82p.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (Índice de costos de la construcción pesada (ICCP)), [Sitio web]. Bogotá: MINITRABAJO. [Consulta: 8 de octubre 2020]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/indice-de-costos-de-la-construccion-pesada>

GÓNGORA, Robert y LÓPEZ, Richard. “Rendimientos de mano de obra para los diferentes sistemas constructivos de placas entrepiso aligeradas aplicadas en la ingeniería civil en la región. Tesis de Pregrado. Girardot: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil, 2020. 102p.

HANCCO, Henry *et al.* Implementación del Last Planner y la metodología del valor ganado en proyectos civiles construcción de puentes red vial 5 – Huacho. Tesis de Maestría. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Programa de maestría en dirección de la construcción, 2019. 108p.

HERNÁNDEZ, Miguel Ángel y TORRES, Ana María. Implementación y puesta en marcha del proyecto para la ampliación del Puente de la Caro,” Tesis de Especialización. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias

Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2018. 236p.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, “Manual de interventoría de obra pública,” Bogotá: INVÍAS, 2013. 1-1

JACKSON, Michelle Bowles. Estimates are just that. *PM Network*. 2012, vol. 6 no. 98, pp. 56-64.

KHALIFA Rafa y DAIM, Tugrul. “Project Assessment Tools Evaluation and Selection Using the Hierarchical Decision Modeling: Case of State Departments of Transportation in the United States,” *Journal of Management in Engineering*. 2020, vol. 37, no. 1, p.p.23 doi: 10.1061/(asce)me.1943-5479.0000858.

KOZIKOWSKI, Zbigniew. “Matemáticas financieras El valor del dinero en el tiempo,” México: McGraw Hill Interamericana, 2007. pp. 62-65.

MARÍA, Forella Angelita y NARVÁEZ, Diego André. Guía PMBOK para mejorar la productividad en fabricación de puentes alma llena. División metal mecánica, empresa SIMA S.A. Chimbote. Tesis de Pregrado. Chimbote: Universidad César Vallejo. Facultad de ingeniería. Gestión Empresarial y Productiva, 2018. 145p.

MAYOR, Julián; BOTERO, Sergio y GONZALEZ, Juan. Modelo de decisión multicriterio difuso para la selección de contratistas en proyectos de infraestructura: caso Colombia. *Revista Obras por Impuestos*. 2016, no. 20, pp. 56–74.

MINISTERIO DE TRANSPORTE. “Gestor de Proyectos de Infraestructura.” [Sitio web]. Bogotá: MINITRABAJO. [Consulta: 8 de diciembre 2020]. Disponible en: <https://gpi.mintransporte.gov.co/menuReports/list>

OLAYA, Mónica Eneria; MONTAÑA, Juana y UMAÑA, Franz Alexis, “Estudios, diseño y construcción de los puentes vehiculares la Negra, Santiago y la Comba. Tesis de Especialización. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2019.

112p.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO. "Rendimientos mínimos y promedios de mano de obra en Lima. Lima: OIT, 2003. p.1.

OTERO, Andres Felipe y GÓMEZ, Ricardo. "Construcción de un tramo del puente sobre el Rio Magdalena que unirá Magangué con Mompox (Bolívar).," Tesis de Especialización. Bogota: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2018. 225p.

PACHECO, Antonio Fair. "Estudios, diseños y construcción del puente sobre el Río Lebrija en el corregimiento de Terraplén en el municipio de San Martín - Cesar," Tesis de Especialización. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2019. 286p.

PORRAS, H, *et al.* "Tecnologías 'Building Information Modeling' en la elaboración de presupuestos de construcción de estructuras en concreto reforzado," *Revista Entramado*, 2015, vol. 11, no. 1, pp. 230–249, 2015, doi: 10.18041/entramado.2015v11n1.21116.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, "Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía de PMBOK)," Pensilvania: Newtown Square, 2013, p. 51-56.

ROCHA, Sandra Patricia; SANCLEMENTE, Elmer y RAMOS, Diana Lorena. "Construcción puente vehicular sobre el rio Orteguzza en el departamento de Caquetá. Tesis de Especialización. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia. Facultad de Ciencias Sociales y Empresariales. Especialización en gerencia de proyectos, 2018. 225p.

RODRÍGUEZ, Emilio Enrique. “Análisis de metodologías de estimación de duración de actividades en proyectos de ingeniería civil,”. Tesis de Pregrado. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. 2016. 144p.

SAATY, Tomas. Transport planning with multiple criteria: the analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of Advanced Transportation*. 1995, 29(1), pp. 81-126.

SALAS, Julio; LEYVA, Máximo y CALENZANI, Adolfo. “Modelo del proceso jerárquico analítico para optimizar la localización de una planta industrial.” *Revista Industrial Data*. 2014, vol. 17, no. 2, pp. 112–119.

SEMINARIO, Manrique Ernesto. Guía para el diseño de puentes con vigas y losas. Tesis de Pregrado. Piura: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil, 2004. 225p.

SERPA, Rocky Gustavo y TINEO, Carlos Antonio. “Dirección de proyecto con aplicación de la Guía del PMBOK®, en un proyecto de construcción de puente, Tesis de Maestría. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Programa de Maestría en Administración y Dirección de Proyectos, 2015. 279p.

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE. Procesos. [Sitio web]. Bogotá: SENA. [Consulta: 8 de noviembre 2020]. Disponible en: http://contratacion.sena.edu.co/_file/procesos/248_10.xls

SZWED, Paul. “Expert Judgment in Project Management: Narrowing the Theory-Practice Gap,” In Project Management Institute, Inc, Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, 2016. p.4-5.

VÁSQUEZ, Franco Dante. “Planificación y Control en el Desarrollo de la Construcción del Puente Carretero con la Aplicación Last Planner en la Provincia Huari – Áncash,” Tesis de Pregrado. Lima: Universidad César Vallejo. Facultad de

Ingeniería. Administración y Seguridad en la Construcción, 2018. 178p.

VELAZCO, Freddy Marcelo. Gestión de tiempo, comunicación y riesgos, en la construcción de la cimentación profunda; pilotaje del estribo 2, pilares 4 y pilares 3 del Puente Chilina - Arequipa, Aplicando los fundamentos de la guía de dirección de proyectos difundidos por el Project. Tesis de Especialización. Arequipa: Universidad Católica Santa María. Facultad de arquitectura e ingeniería civil y del ambiente. Programa de ingeniería civil, 2013. 226p.

VERBEL, Harol. Análisis cuantitativo de riesgos constructivos en puentes bajo la metodología del PMI caso de estudio: Puente Barú, Cartagena - Bolívar. Tesis de Pregrado. Cartagena: Universidad de Cartagena. Facultad de ingeniería civil. 2014. 86p.

VISUALIZING SCIENTIFIC LANDSCAPES. Consulta biométrica. [Sitio web]. VOSviewer. [Consulta: 20 de octubre 2020]. Disponible en: <https://www.vosviewer.com/>