



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

EL EFECTO DE CONVERGENCIA DE RUTAS PARALELAS EN LA PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE OBRAS PÚBLICAS

Línea de investigación:

Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio

Tesis para optar el grado académico de Maestro en Gerencia de la
Construcción Moderna

Autor

Vilca Carrillo, Eder Omar

Asesor

Cancho Zuñiga, Gerardo Enrique

ORCID: 0000-0002-0684-5114

Jurado

Pumaricra Padilla, Raúl Valentin

Barrantes Mann, Luis Alfonso Juan

Madrid Saldaña, Cesar Karlo

Lima - Perú

2026

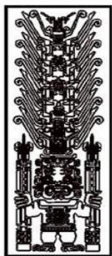
EL EFECTO DE CONVERGENCIA DE RUTAS PARALELAS EN LA PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE OBRAS PÚBLICAS.

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	13%	2%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.coursehero.com	2%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.unfv.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	docplayer.es	1%
	Fuente de Internet	
4	1library.co	1%
	Fuente de Internet	
5	issuu.com	1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.ucv.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
8	latam.redilat.org	1%
	Fuente de Internet	
9	es.slideshare.net	<1%
	Fuente de Internet	
10	www.clubensayos.com	<1%
	Fuente de Internet	



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

EL EFECTO DE CONVERGENCIA DE RUTAS PARALELAS EN LA PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE OBRAS PÚBLICAS

Línea de investigación:

Construcción sostenible y sostenibilidad ambiental del territorio

Tesis para optar el grado académico de
Maestro en Gerencia de la Construcción Moderna

Autor

Vilca Carrillo, Eder Omar

Asesor

Cancho Zuñiga, Gerardo Enrique

ORCID: 0000-0002-0684-5114

Jurado

Pumaricra Padilla, Raúl Valentin

Barrantes Mann, Luis Alfonso Juan

Madrid Saldaña, Cesar Karlo

Lima – Perú

2026

DEDICATORIA

A mis padres Julián y Paulina

A mi esposa Blanca Victoria, a mis hijos Santiago y Nazareth,

A mis hermanos Danny y Leticia

A Dios, por darme la fortaleza para no darme por vencido.

AGRADECIMIENTO

Mi especial reconocimiento al Dr. Mario Vancoucke

de la Universidad de Ghent, Bélgica.

Quien, a pesar de su agenda, siempre se daba un tiempo para responder mis correos guiándome desinteresadamente en el desarrollo de esta investigación.

Mi agradecimiento a mi asesor de tesis:

Dr. Gerardo Enrique Cancho Zuñiga

Quien fuera mi profesor de pregrado en la prestigiosa Facultad de Ingeniería Civil de la UNFV

Muchas Gracias a él y a los miembros del jurado

ÍNDICE

RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.2. Descripción del problema	9
1.3. Formulación del problema:	12
1.3.1. Problema general	12
1.3.2. Problema específico	12
1.4. Antecedentes	12
1.4.1. Antecedentes internacionales.....	12
1.5. Justificación de la investigación	15
1.5.1. Justificación teórica	15
1.5.2. Justificación metodológica.....	15
1.5.3. Justificación social	15
1.6. Limitaciones de la investigación.....	16
1.6.1. Limitación bibliográfica.....	16
1.6.2. Limitación teórica	16
1.6.3. Limitación institucional	16
1.7. Objetivos de la investigación	17
1.7.1. Objetivo general.....	17
1.7.2. Objetivo específico	17

1.8.	Hipótesis	17
1.8.1.	Hipótesis general.....	17
1.8.2.	Hipótesis específica	17
II.	MARCO TEÓRICO.....	19
2.1.	Marco conceptual.....	19
III.	MÉTODO	50
3.1.	Tipo de investigación.....	50
3.2.	Población y muestra.....	51
3.3.	Operacionalización de variables	53
3.4.	Instrumentos.....	54
3.5.	Procedimientos.....	55
3.6.	Análisis de datos	55
3.7.	Consideraciones éticas	55
IV.	RESULTADOS.....	57
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
VI.	CONCLUSIONES	64
VII.	RECOMENDACIONES.....	65
VIII.	REFERENCIAS.....	66
IX.	ANEXOS	69
	Anexo A. Matriz de consistencia	69
	Anexo B. Base de datos con los proyectos de la muestra	70
	Anexo C. Instrumento de recolección de datos	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Duración método PERT-CPM vs método Montecarlo	6
Tabla 2. Proyectos a nivel mundial que han incurrido en sobrecostos	10
Tabla 3. Simulaciones para el cálculo de la duración del proyecto	36
Tabla 4. Simulaciones para el cálculo de la duración del proyecto	37
Tabla 5. Consolidación de resultados	39
Tabla 6. Consolidación de resultados	44
Tabla 7. Tabla de cálculo de topological float (TF).....	48
Tabla 8. Operacionalización de variables	53
Tabla 9. Distribución de los proyectos analizados según su índice SP	58
Tabla 10. Clasificación de las obras en función a su costo y tiempo final	59
Tabla 11. Detalle de los montos contratados de las obras analizadas.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ruta crítica de una red de programación con la metodología PERT - CPM.....	2
Figura 2. Ejemplo de convergencia de rutas paralelas.....	2
Figura 3. Red de actividades con presencia de convergencia de rutas paralelas	3
Figura 4. Red “Alpha” 2 rutas paralelas que convergen en el punto “q”	4
Figura 5. Red “Beta” con 3 rutas paralelas que convergen en el punto “q”	4
Figura 6. Red “Gamma” con 4 rutas paralelas que convergen en el punto “q”	5
Figura 7. Red "omega" con 5 rutas paralelas que convergen en el punto "q"	5
Figura 8. Red de programación de proyectos de 9 actividades	20
Figura 9. Red de programación de proyectos con 20 actividades	20
Figura 10. Diagramación de la secuencia fin - inicio	21
Figura 11. Diagramación de la secuencia inicio - inicio.....	22
Figura 12. Diagramación de la secuencia fin - fin.....	22
Figura 13. Diagramación de los tiempos optimistas según la metodología CPM	23
Figura 14. Diagramación de los tiempos pesimistas según la metodología CPM.....	23
Figura 15. Diagramación de la holgura según la metodología CPM.....	24
Figura 16. Diagramación de un proyecto según la metodología CPM.....	25
Figura 17. Diagrama de barras o diagrama de Gantt	27
Figura 18. Proyecto misil balístico Polaris en donde se utilizó el método PERT	29
Figura 19. Función de probabilidad tipo beta	30
Figura 20. Ejemplo de convergencia de rutas paralelas.....	34

Figura 21. Malla de programación de proyectos con rutas paralelas convergentes	35
Figura 22. Proyecto n°1 con actividades en serie	36
Figura 23. Proyecto n°2 con actividades en paralelo.....	37
Figura 24. Red de programación con actividades arregladas en serie	40
Figura 25. Red de programación de proyecto con actividades en paralelo	41
Figura 26. Red de programación de actividades de un proyecto	42
Figura 27. Red de programación de actividades de un proyecto	43
Figura 28. Cálculo del indicador LA del proyecto	46
Figura 29. Cálculo del indicador TF del proyecto	48
Figura 30. Mapa de calor índice (SP) vs valor referencial de la obra (S/.).....	57
Figura 31. Distribución de los proyectos analizados	58
Figura 32. Distribución de los proyectos con riesgo en %	59
Figura 33. % Sobretiempo de acuerdo al rango del proyecto	61
Figura 34. % Sobrecostos de acuerdo al rango del proyecto	61

RESUMEN

El presente trabajo hace énfasis al efecto de convergencia de rutas paralelas en las redes de programación de proyectos. Este efecto, cuyo nombre original es “Merge Event Bias”, y que traduciremos como “sesgo por convergencia de actividades”, se materializa cuando hay presencia de varias rutas paralelas en las redes de programación de proyectos. En primer lugar, realizaremos un breve recuento de cómo funcionan las metodologías convencionales (Diagrama de Gantt, PERT y CPM) demostrando que estos métodos ampliamente conocidos en nuestro país, no brindan al programador una adecuada respuesta cuando el efecto de sesgo por convergencia hace su aparición. Cabe señalar que este efecto es poco conocido, y que a pesar de haber sido abordado por la comunidad científica no ha tenido la difusión suficiente, razón por la cual se espera con la presente tesis visibilizar dicho efecto, para posteriormente indicar el impacto en los proyectos ejecutados en nuestro país. Para el desarrollo del presente trabajo se introducirán conceptos como la simulación de Montecarlo y el análisis de riesgos, herramientas que se han introducido en los últimos años y que proporcionan a los programadores de proyectos incluir incertidumbres que las metodologías convencionales no ofrecen, demostrando que el efecto de convergencia podría ser la razón por la cual algunos proyectos no culminan dentro de su plazo de ejecución.

Palabras clave: merge event bias, simulación de Montecarlo, análisis de riesgos, metodología PERT, metodología CPM.

ABSTRACT

The present work emphasizes the effect of convergence of parallel paths in project scheduling networks. This effect, originally named 'Merge Event Bias,' occurs when there are several parallel paths in project scheduling networks. First, we will provide a brief overview of how conventional methodologies (Gantt Chart, PERT, and CPM) work, demonstrating that these widely known methods in our country do not provide the scheduler an adequate response when the bias effect due to convergence comes into play. It is worth noting that this effect is little known, and despite being addressed by the scientific community, it has not received sufficient dissemination. For this reason, this thesis aims to make this effect visible, and later indicate its impact on projects executed in our country. For the development of this work, concepts such as Montecarlo simulation and risk analysis will be introduced, tools that have been developed in recent years and provide project programmers with the ability to include uncertainties that conventional methodologies do not offer, demonstrating that the convergence effect could be the reason why some projects do not finish within their execution timeframe.

Keywords: merge event bias, Montecarlo simulation, risk analysis, PERT (program evaluation and review technique), CPM (critical path method).

I. INTRODUCCIÓN

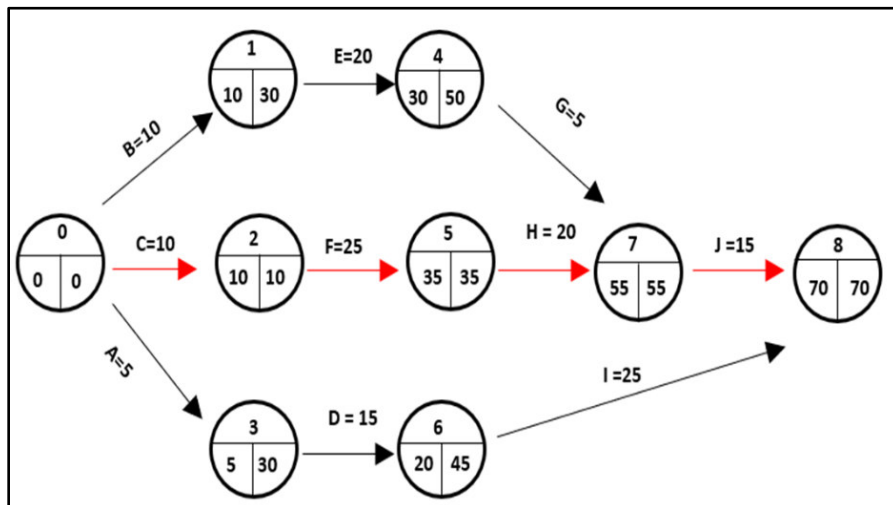
Las metodologías más utilizadas para la programación y gestión de proyectos de construcción en nuestro medio son el método PERT (Programa Evaluation and Review Technique) y el CPM (Critical Path Method) por sus siglas en inglés. Ambas metodologías de programación han sido adoptadas por la comunidad ingenieril en nuestro país, debido a su flexibilidad y su adaptabilidad en la programación de obras, ya sean obras grandes o pequeñas (construcción de carreteras, obras de ingeniería hidráulica, remodelaciones o ampliaciones de infraestructura, entre otras).

Un proyecto no es más que un conglomerado de eventos en donde el factor incertidumbre está presente, y en el cual los riesgos inherentes podrían afectar la estimación de cada evento y por ende la duración total del proyecto, por lo que es imperante y necesario utilizar la probabilidad como herramienta matemática para calcular o “acercarse” a la duración exacta.

La metodología PERT-CPM señala que, la duración de un proyecto está definida por una cadena de actividades, predominando una “ruta crítica”, esta ruta de sufrir algún tipo de retraso en su cumplimiento, retrasaría todo el proyecto, (Ver fig. n°1). Siendo para este método de programación, el concepto de ruta crítica de vital importancia. Así mismo, para el cálculo de duración de cada actividad se recurre al cálculo probabilístico, vale decir se consideran tres duraciones suministradas por “expertos”, las cuales promedian tres duraciones para así estimar la duración de un evento o actividad, estas son (a) duración optimista; (m) duración más probable; y (b) duración pesimista. El tiempo esperado (T_e) se calcula mediante la formula $(a+4m+b)/6$, por cada actividad.

Figura 1

Ruta crítica de una red de programación con la metodología PERT - CPM

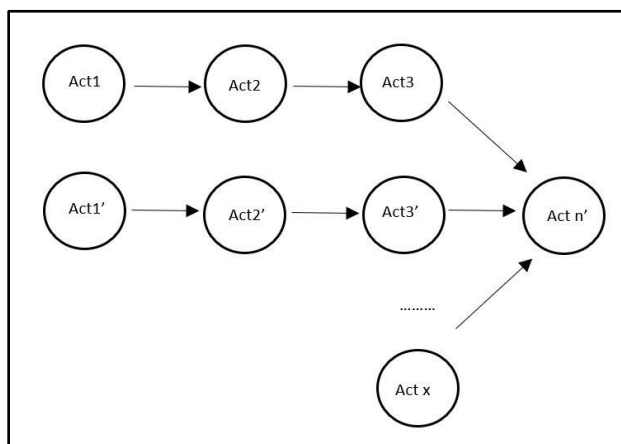


Es aquí donde aparece la primera preocupación respecto a la precisión de PERT-CPM, ya que su metodología “per se”, restringe la posibilidad de la aparición de otras rutas críticas.

Otro de los aspectos que la metodología PERT-CPM ignora por completo es el efecto de convergencia de rutas paralelas (traducción al español de “Merge event bias”), efecto que se pretende graficar con el figura 2.

Figura 2

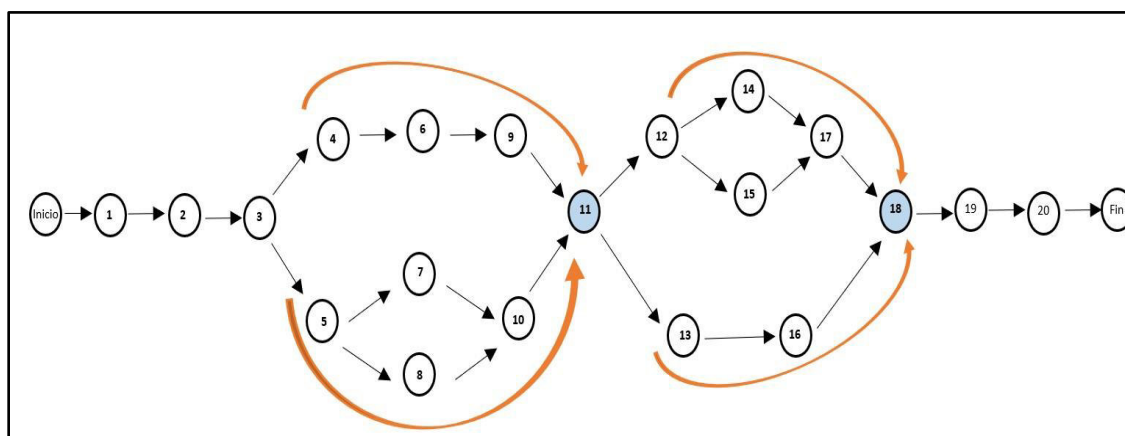
Ejemplo de convergencia de rutas paralelas



La figura 3, corresponde a una red de 20 actividades, en la cual se pueden visualizar dos rutas paralelas que convergen en la actividad 11, y dos rutas paralelas que convergen en la actividad 18. Este es un claro ejemplo del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas, en una red de programación de actividades.

Figura 3

Red de actividades con presencia de convergencia de rutas paralelas

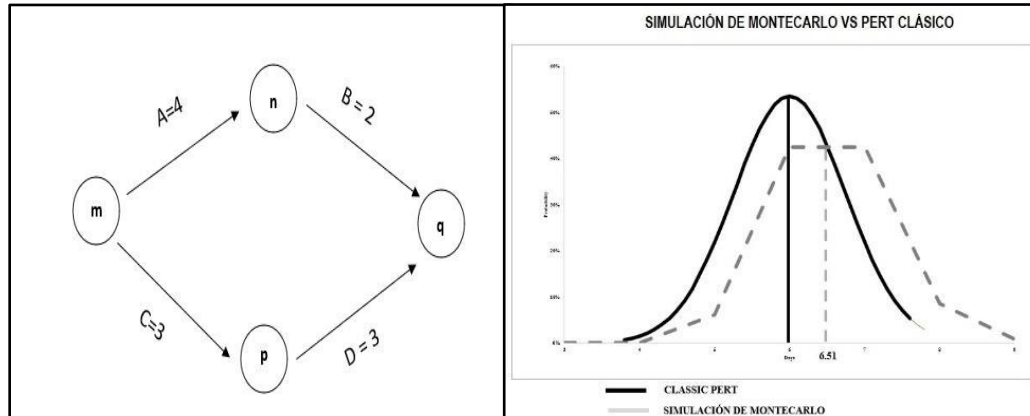


En este estudio se pretende demostrar que, a mayor presencia de rutas paralelas, mayor riesgo de incurrir en sobrecostos o exceder el plazo de ejecución inicial de los proyectos. A continuación, se procederá con un ejemplo sencillo para la demostración de dicho efecto.

Se puede apreciar en la figura 4 que la red “Alpha” está conformada por (2) dos rutas paralelas que convergen en una sola actividad, Advertimos que la duración total del proyecto, aplicando la metodología PERT-CPM es de 6 días. Sin embargo, si aplicamos el método de Montecarlo, la cual se explicará más adelante a detalle, la duración se incrementa a 6.51 días.

Figura 4

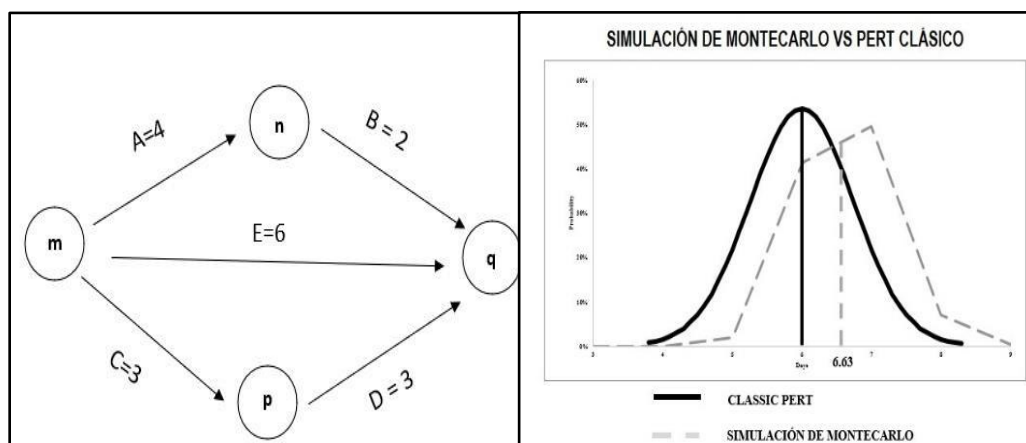
Red "Alpha" 2 rutas paralelas que convergen en el punto "q"



Ahora realizamos el mismo ejercicio para con la red "Beta" de la figura 5, la que consta de (3) tres rutas paralelas, las cuales convergen en una sola actividad. Para este caso la duración total del proyecto usando la metodología PERT-CPM es nuevamente de 6 días, y mediante la metodología de Montecarlo la duración total es de 6.63 días.

Figura 5

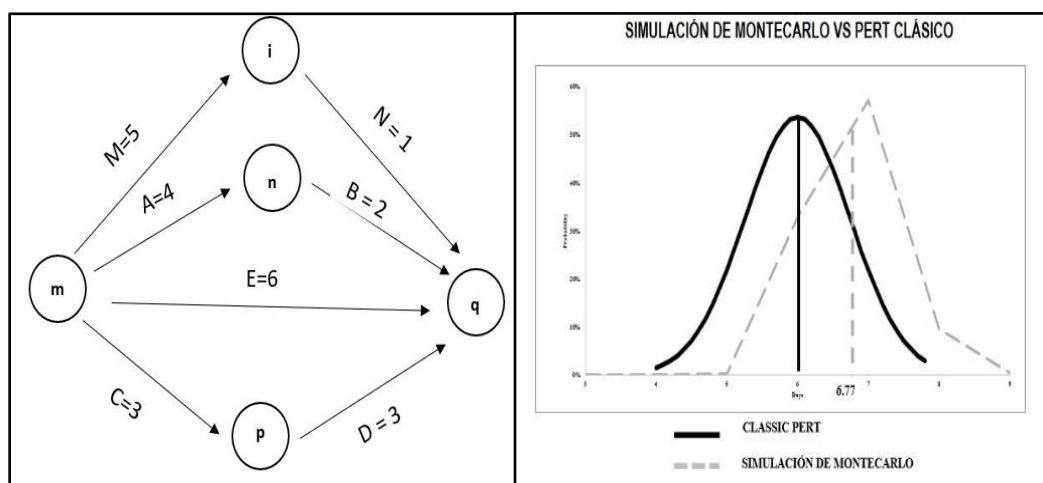
Red "Beta" con 3 rutas paralelas que convergen en el punto "q"



Del mismo modo para la red “Gamma” de la figura 6, la cual consta de (4) cuatro rutas paralelas, su duración mediante la metodología PERT-CPM es de 6 días, y con el método de Montecarlo su duración total es de 6.77 días.

Figura 6

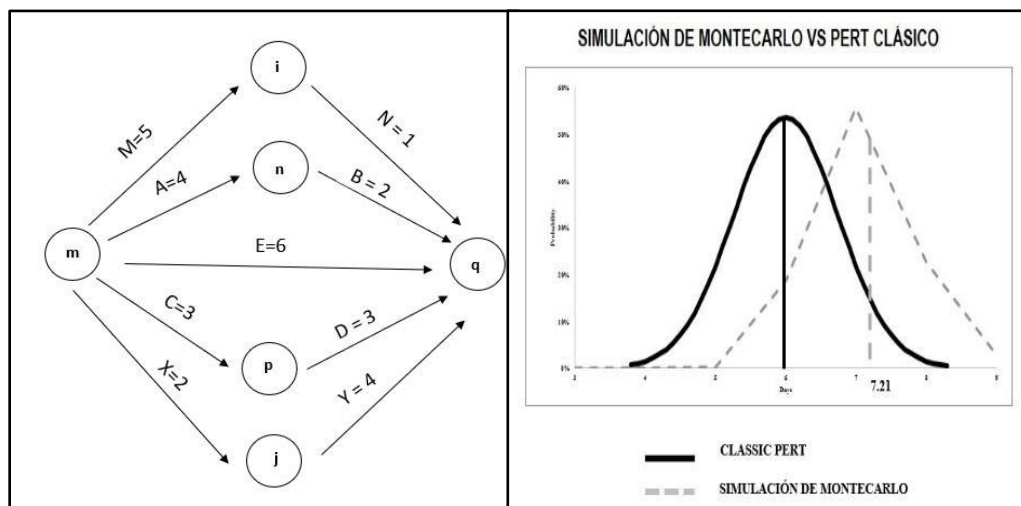
Red "Gamma" con 4 rutas paralelas que convergen en el punto "q"



De la misma manera procedemos con la malla de la figura 7.

Figura 7

Red "Omega" con 5 rutas paralelas que convergen en el punto "q"



Como se puede apreciar las mallas correspondientes a las figuras 4, 5 ,6 y 7 tienen una duración de 6 días, calculadas con la metodología PERT-CPM, pero a medida que se van incrementando el número de rutas paralelas obtenemos un incremento en la duración de cada malla tal como se detalla a manera de resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1

Duración método PERT-CPM vs método Montecarlo

Nombre de la Malla	Nº rutas paralelas	Duración	Duración	% Variación
		PERT CPM (días)	Montecarlo (días)	
Alfa	2	6.00	6.51	8.50%
Beta	3	6.00	6.63	10.00%
Gamma	4	6.00	6.77	12.80%
Omega	5	6.00	7.19	20.00%

Nota: Con base en los resultados obtenidos, visualizamos que a medida que se van incrementando el número de rutas paralelas en cada malla de programación, el tiempo estimado para su culminación se incrementa, mientras que la duración calculada con la metodología PERT-CPM de mantiene constante.

1.1. Planteamiento del problema

Es de indicar que, la comunidad científica no ha cuestionado la precisión, ni la veracidad de la metodología PERT-CPM desde sus inicios, a finales de la década del '60, asumiendo su eficacia sin disentir, ni poniendo a prueba su metodología, esto en gran parte a que PERT-CPM, es un mecanismo de fácil entendimiento y aplicación, el cual fue adoptado rápidamente por la comunidad ingenieril en todo el mundo.

Desafortunadamente, no podemos calcular con exactitud la duración de las actividades que forman parte del proyecto, a pesar de que la metodología PERT-CPM proporciona la fórmula ($T_e = (a+4m+b)/6$; siendo a = tiempo optimista, m = duración más probable; y b = tiempo pesimista) para estimar las duraciones. Además, esta metodología se enfoca solo en la ruta dominante, tal como se señaló líneas arriba, desconociendo la aparición de otras rutas críticas alternativas y los riesgos asociados a estas, ignorando intrínsecamente la posibilidad de que el cronograma pueda verse afectado. Otro aspecto, que no se refleja con la metodología PERT-CPM es el riesgo asociado producido por la convergencia de actividades paralelas, por lo que el presente estudio pretende demostrar el impacto de dicho efecto en la programación de los proyectos de obras públicas en el Perú.

La presencia de múltiples actividades paralelas contribuye a la aparición de riesgos en el cronograma de la obra, por lo que proyectos con muchas actividades paralelas son potencialmente

más riesgosos de los proyectos con baja presencia de estas, explicando en muchos casos algunos la razón por la que algunos proyectos exceden su plazo de ejecución.

En ese sentido, una de las herramientas más utilizadas para el análisis de riesgos, es el método de simulación de “Montecarlo”, dicho método consiste en recrear cientos o miles de posibles escenarios, considerando la capacidad de cambio y la aleatoriedad de los componentes del proyecto, evaluando correctamente el efecto de convergencia mediante múltiples repeticiones e iteraciones que son procesadas con la ayuda de un computador incluyendo los riesgos que PERT-CPM no hace.

Esta simulación provee a los responsables del proyecto, información valiosa para la toma de decisiones, por ejemplo, que tipo de actividades tienen alta probabilidad de tornarse críticas o cuantas rutas críticas alternativas pueden aparecer e impactar negativamente el proyecto, toda esta información puede mejorar significativamente la toma de decisiones de los directores y/o gerentes de proyectos, especialmente en proyectos de gran complejidad.

Una gran variedad de artículos científicos muestra gran preocupación por la inadecuada gestión de los proyectos, limitaciones del procedimiento convencional de la metodología PERT - CPM, criticando el hecho de que dicho método basa el cálculo de la duración de las actividades usando el método determinístico, calculando y confiando en una ruta crítica única, donde en realidad, puede haber numerosas rutas críticas posibles existentes.

Al realizar una programación confiando en la certeza de la metodología PERT – CPM, se está confiando en que las posibilidades de éxito son realmente buenas, cuando en el fondo, esta programación contiene un sesgo considerable. Por lo tanto, este estudio pretende demostrar que la cantidad de rutas paralelas presentes en la programación de un proyecto, incrementa el riesgo del efecto de convergencia. A medida que se incrementen la presencia de múltiples rutas

paralelas con medias relativamente iguales, los cálculos PERT-CPM estarán considerablemente sesgados.

En nuestro país, existe poca investigación referente al desarrollo de nuevas metodologías de programación de obra, nos hemos limitado simplemente a aplicar sin cuestionar la metodología PERT-CPM, agregando el hecho de que estos métodos son impartidas en las aulas universitarias a las distintas facultades de ingeniería civil y arquitectura en nuestro país, por lo que esta investigación pretende alertar acerca de las debilidades que presenta el método.

1.2. Descripción del problema

Respecto a uno de los investigadores que ha analizado una variedad de proyectos ejecutados en distintas partes del mundo, Flyvbjerg (2017) señala que:

Los sobrecostos no son un problema que afecta solamente a las obras ejecutadas en el sector público, sino también al sector privado, y las cosas parecen no mejorar; la tasa de sobrecostos ha permanecido alta y constante en los últimos 90 años de proyectos analizados. La geografía parece no importar, proyectos de los 104 países y de los 6 continentes de donde existen datos disponibles, sufren de sobrecostos. (p.10)

Flyvbjerg (2017) expone una serie de proyectos ejecutados a nivel mundial, los cuales concurrieron en mayor costo, señalando como uno de los proyectos que experimentó mayor sobre costos durante su construcción, fue el canal Suez en Egipto, que une el mar Mediterráneo con el golfo de Suez, que fuera construido en el siglo XIX registrando un sobrecosto de 1900% sobre su costo original, asimismo menciona también algunos proyectos que fueron ejecutados con sobrecostos, según se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 2

Proyectos a nivel mundial que han incurrido en sobre costos

Proyecto	País	Sobre costo (%)
Canal Suez	Egipto	1900
Parlamento Escoces	Escocia	1600
Sydney Opera House	Australia	1400
Linea de Tren “Troy and Greenfield”	USA	900
Juegos Olimpicos de Montreal	Canada	720
Banco de Noruega	Noruega	440
Canal de Panama	Panamá	200
Puente Brooklyn	USA	100
Metro de Bangkok	Tailandia	70

Nota: Estos son algunos de los proyectos más emblemáticos a nivel mundial que superaron su valor referencial original incurriendo en sobre costos. Adaptada de *proyectos con calamitosa historia en sobre costos* (p.13), por Flyvberg, 2017, Manual de gestión de proyectos de la universidad de Oxford.

Para Lenfle (2017) las tres principales causas que originan los retrasos en los proyectos son: 1) La subestimación de los riesgos; 2) Pobre gestión de proyectos y 3) cambios constantes en el alcance del proyecto.

Respecto a la subestimación de los riesgos, los responsables del proyecto (directores y/o Gerentes), creen tener todo planificado desde un inicio, sin embargo, no contemplan que la obra está expuesta a múltiples riesgos, por lo que si se pretende que el proyecto sea exitoso,

estos riesgos deben de ser anticipados y manejados. La segunda causa, está relacionada a la falta de integración de los distintos actores del proyecto, suministro de los materiales a tiempo, pagos a los proveedores, capacidad técnica del plantel de la obra, etc. Finalmente, la tercera causa está relacionada al cambio constante en el proyecto atribuido a debilidades en el expediente técnico, generando ampliaciones en la ejecución de la obra. (Lenfle, 2017)

Otro estudio publicado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2019) señala que algunos proyectos exceden su presupuesto inicial, enfatizando que los sobrecostos y las demoras en la ejecución de los proyectos son un fenómeno global que afecta a la mayoría de las obras.

El promedio de sobrecostos fue de 45.6% para una muestra de 310 proyectos viales ejecutados entre el año 2004 y el año 2015 en diferentes países alrededor del mundo. BID (2019).

En nuestro país, la Contraloría General de la República del Perú a través del Observatorio Nacional Anticorrupción, en su informe de obras públicas paralizadas señala que al cierre del mes de marzo del 2025 (CGR, 2025) hubo 2572 obras paralizadas en los tres niveles de gobierno (Nacional, regional y local), estimando ese costo en 43,163 millones de soles. Siendo la modalidad de ejecución por administración indirecta (por contrata) la que contiene mayor cantidad de obras paralizadas, seguida por la modalidad de Asociación Público Privada. Asu vez dicho reporte menciona como causal principal, incumplimiento de contrato, seguido de la falta de recursos y liquidez del contratista, y como tercera causa señala a las deficiencias en el expediente técnico.

Otros problemas recurrentes que valen la pena señalar, que contribuyen a la paralización de las obras en menor proporción son, las disputas legales, conflictos sociales y problemas debidos a la aparición de los sindicatos de construcción, los cuales impactan negativamente al mismo. CGR (2025).

1.3. Formulación del problema:

1.3.1. Problema general

¿En qué medida, la presencia del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas impacta en los proyectos de obras de construcción públicas?

1.3.2. Problema específico

¿En qué medida la presencia del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas impacta en la duración de los proyectos de obras de construcción públicas?

¿En qué medida la presencia del efecto de convergencia de rutas paralelas impacta en el costo de los proyectos de obras de construcción públicas?

1.4. Antecedentes

1.4.1. Antecedentes internacionales

En referencia al impacto que tienen la convergencia de rutas paralelas en la programación de proyectos, Hullet (2009) formula las siguientes preguntas y ensaya la respuesta:

¿Por qué no tenemos la necesidad de analizar los riesgos en las rutas que no son críticas de acuerdo a la metodología CPM?, ¿Es suficiente enfocarse solo en el riesgo de la ruta crítica señalada por la metodología CPM y enfocarse menos en las otras rutas críticas? La respuesta para estas preguntas recae en el sesgo por convergencia de actividades. Siendo este efecto visible cuando varias rutas paralelas convergen en una sola actividad. Examinamos y demostramos que la vieja metodología PERT no brinda las respuestas

correctas al efecto de convergencia de actividades, ni a proyectos con varias rutas paralelas, debido a que su metodología no reconoce tal efecto. (p.99)

Desde otra perspectiva, existe una opinión similar respecto al efecto de convergencia de rutas paralelas y el análisis de riesgos aplicados a proyectos reales de construcción.

Cuando los riesgos son tomados en cuenta, la duración del proyecto puede ser diferente al promedio establecido por el método determinístico CPM. Por lo tanto, debemos establecer que para proyectos reales que contienen múltiples rutas paralelas y puntos de convergencia, la metodología determinística CPM, no ofrece una estimación realista de la duración total del proyecto. El análisis de riesgos identifica y cuantifica dicho efecto, resaltando los componentes verdaderamente críticos. (Vancoucke, 2013, p.99)

Huang y Wang (2009) analizan el método tradicional del cálculo de probabilidad para el riesgo de duración en un proyecto de construcción, mediante la metodología PERT, siendo la metodología utilizada de carácter experimental y descriptivo, de manera que el autor demuestra que, predecir la probabilidad de duración de un proyecto desempeña un papel clave para el éxito del mismo, indicando que el tiempo es igual al dinero, y que la gestión del cronograma es vital y muy importante. Posteriormente analizaron mediante simulaciones de Montecarlo la duración del proyecto, cuyo resultado sugiere que un proyecto posee que muchas rutas críticas, incrementa su riesgo, por lo que la estimación de la duración total del proyecto no debe recaer en solamente una ruta crítica.

Abderisak y Goran (2017) seleccionan de un total de 40 artículos científicos, tomados de diversas revistas indexadas, las causas más recurrentes que ocasionan que los proyectos de

construcción no culminen dentro del tiempo programado, presentándolo a manera de ranking. En esta investigación seleccionó artículos científicos publicados desde el año 1985 al 2014 encontrando como causa principal los problemas financieros que surgen durante la ejecución de los proyectos, ubicando otros factores que causan sobrecostos y demoras en los proyectos de construcción pública, apoyándose mediante el diagrama de Kiviat.

D'onofrio (2012) conmemora y reseña la importancia de la metodología de la ruta crítica o CPM, el cual ha cumplido más de medio siglo de vigencia. El autor señala la importancia que tuvo en su momento el uso de esta metodología, la cual a través del uso de relaciones lógicas y de precedencia entre las actividades permitió el control de proyectos. Con este fin, el artículo científico señala como el CPM identificó qué actividades de trabajo son críticas y cuáles no son críticas o presentan holgura dentro del cronograma de la obra, enfatizando que la ruta crítica es la secuencia más larga de actividades conectadas lógicamente en la programación del proyecto, en otras palabras, la duración total prevista del mismo. Esta investigación realiza un análisis de las ventajas y desventajas de este método de programación convencional en la ingeniería, no obstante, el autor desliza la pregunta, respecto a si es momento de utilizar otras herramientas de programación alternativas.

La presente investigación introduce un nuevo concepto denominado indicadores topológicos, estos indicadores recogen atributos y aspectos que no son tomados en cuenta al momento de realizar la programación de un proyecto. Por ejemplo, hoy en día cualquier software de gestión de proyectos incluye la diagramación de una red, pero poca o ninguna atención ha sido dada a la forma y/o características morfológicas de cada proyecto; o a la relación entre esta

morfología y su grado de incertidumbre, la cual puede impactar en la duración total del mismo. Valadares et al (1999).

1.5. Justificación de la investigación

Esta investigación permitirá evidenciar y cuantificar el efecto de convergencia de rutas paralelas en los proyectos de construcción de obras públicas que son programadas bajo metodologías convencionales, efecto que pasa inadvertido e impacta en la culminación de los proyectos de construcción, transformándose en retrasos e incumplimientos de plazos.

1.5.1. Justificación teórica

El propósito primordial de esta investigación es validar teóricamente las variables objeto de análisis, las cuales se respaldan y han sido validadas a través de investigaciones en tesis, libros, artículos científicos, entre otros. La validación y aplicación de la metodología utilizada, permitirá que se establezca un respaldo a la investigación.

1.5.2. Justificación metodológica

Otro factor primordial determinante que se plantea en esta investigación es demostrar que las variables propias de cada actividad del proyecto deben ser analizadas utilizando análisis de riesgos, y no solamente bajo el enfoque determinista, de manera que al momento de la programación del proyecto se deben de considerar los riesgos de la variabilidad probabilística de cada una de las actividades que forman parte del proyecto.

1.5.3. Justificación social

El propósito primordial de esta investigación es demostrar el impacto que tiene la demora y paralización de las obras de construcción en el desarrollo y bienestar de la sociedad, señalando la importancia por la que deben de ser construidas dentro de los plazos establecidos.

1.6. Limitaciones de la investigación

1.6.1. Limitación bibliográfica

La disponibilidad y acceso a las fuentes bibliográficas que respaldan el presente trabajo de investigación corresponde a investigadores internacionales, en el cual el idioma predominante es el inglés, de manera que los artículos, fuentes y libros han sido escritos en esta lengua. No obstante, debido a las herramientas tecnológicas que existen se ha procedido a realizar traducciones no oficiales.

1.6.2. Limitación teórica

No se evidenciaron artículos científicos, ni publicaciones nacionales, respecto al escrutinio de las metodologías tradicionales de programación, por lo que la gran parte del presente trabajo está documentada con fuentes extranjeras, particularmente con información proveniente de investigadores realizados en universidades de Rusia, universidades Chinas, entre otras. Tampoco fue posible el acceso a investigaciones nacionales u autores de habla hispana que aborden o profundicen la metodología expuesta en el presente trabajo de investigación.

1.6.3. Limitación institucional

El acceso a los insumos, tales como los cronogramas de obras, que se necesitaron para el presente trabajo no se encontraban en su totalidad en los siguientes portales públicos (portal de contrataciones públicas del estado peruano – SEACE, el portal de la Contraloría General de la República - INFObras y el cuaderno de obra digital). Sin embargo, a pesar de contar con dicha limitación se lograron recopilar 150 proyectos de construcción de obras públicas ejecutadas por los tres niveles de gobierno.

1.7. Objetivos de la investigación

1.7.1. Objetivo general

Evaluar y cuantificar el impacto del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la programación de proyectos de construcción de obras públicas.

1.7.2. Objetivo específico

1.7.2.1. Evaluar y determinar el impacto en unidades de tiempo, del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la programación de proyectos de construcción de obras públicas.

1.7.2.2. Evaluar y determinar el impacto en unidades monetarias, del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la programación de proyectos de construcción de obras públicas.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

El efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la programación de los proyectos de construcción de obras públicas, incrementa el riesgo de sobrepasar los límites de costo y plazo de ejecución.

1.8.2. Hipótesis específica

1.8.2.1. El efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la programación de los proyectos de construcción, incrementa el riesgo de sobrepasar el costo de la obra.

1.8.2.2. El efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la programación de los proyectos de construcción, incrementa el riesgo de sobrepasar el plazo de ejecución de la obra.

El programa de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2017) define a los objetivos de desarrollo sostenible ODS como un llamado global para tomar medidas con el fin de mitigar los aspectos nocivos de la sociedad moderna e incrementar el bienestar. Los 17 objetivos fueron aprobados en el 2015 por representantes de 193 países. Las universidades son llamadas a contribuir activamente para alcanzar las metas y objetivos establecidos, capacitando a sus estudiantes con las habilidades y respuestas necesarias para contribuir el logro de sus objetivos.

La presente investigación se alinea con el objetivo n°9 Industria, innovación e infraestructuras, ya que se pretende fomentar la innovación y promover técnicas que promueven la industrialización sostenible, esto debido a que la industria de la construcción, en nuestro país es considerada uno de los motores del crecimiento nacional.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. *Redes o mallas de programación de proyectos*

Una red o malla de programación, se define como la herramienta utilizada en la construcción de proyectos para representar de manera gráfica la distribución de las actividades del mismo, dicha malla está compuesta por una serie de actividades o sucesos, que representan las distintas tareas de un proyecto, y que además se encuentran interconectadas mediante relaciones de sucesión y precedencia. Dependiendo de la magnitud del proyecto tendremos redes pequeñas, medianas o redes gigantes, (Ver figura 8 y 9). No hay un consenso universal para diferenciar el tamaño de las redes en función a la cantidad de actividades que la conforman, por lo que muchas veces se deja a discrecionalidad del programador de la obra, el tamaño de la malla. Imaginemos por un instante el diagrama de red para la programación del Aeropuerto de Chinchero en Cusco, que estaba conformada por cerca de 4000 actividades, o pensemos una obra de protección ribereña, en donde se tienen malla de 50 actividades; Por tanto, la dimensión de la malla está ligada al número de actividades que la conforman.

Otro aspecto que define el tamaño de la malla es el tipo de proyecto, por ejemplo la programación de la construcción de una edificación difiere de la programación de un proyecto de carreteras, esta a su vez difiere de un proyecto de saneamiento, y esta es distinta a la programación de la construcción de un puente; dicho de otro modo, a medida que cambia la tipología del proyecto y/o se incrementa la complejidad del mismo, más grande y compleja se torna la red, por lo que la labor del responsable de la programación de la obra se vuelve más laboriosa. Ahora bien,

definamos que, una vez establecidas el tipo de proyecto, la cantidad de tareas o actividades; y la relación de sucesión/precedencia de las mismas, habremos confeccionado la red de programación y por añadidura tendremos la duración total del proyecto. En las figuras n° 8 y n° 9 se presentan a manera de ejemplo 2 mallas con distintos números de actividades.

Figura 8

Red de programación de proyectos de 9 actividades

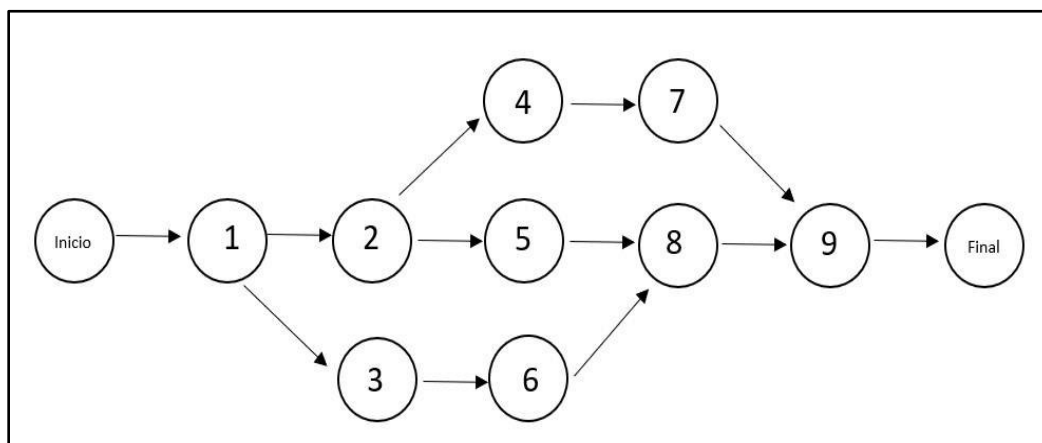
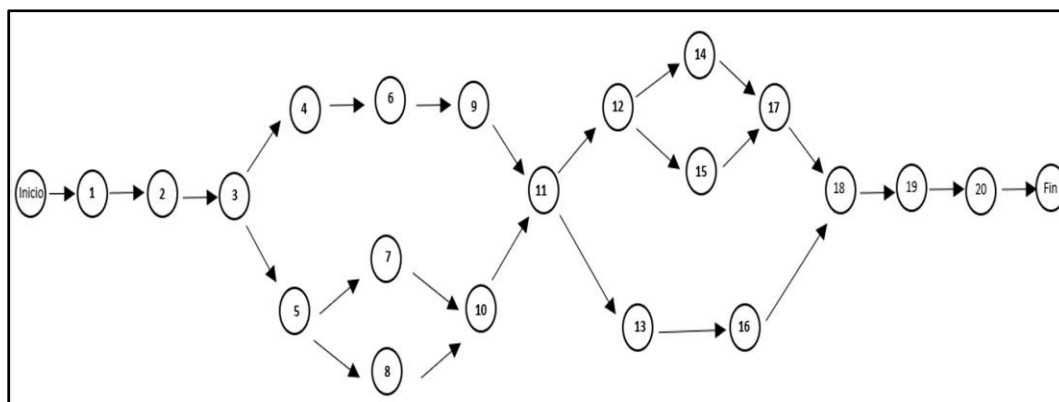


Figura 9

Red de programación de proyectos con 20 actividades



2.1.2. Definición de actividad

En la industria de la construcción se define como actividad a una tarea o suceso que tiene una duración, además de un inicio y un fin, esta tarea es ejecutada por lo general por un especialista (capataz de obra, operario de construcción, etc.), y debe ser completada en un tiempo determinado.

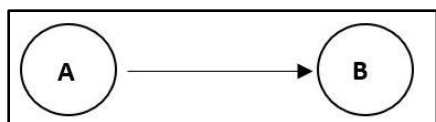
Como se mencionó líneas arriba, las actividades se encuentran ligadas unas con otras a través de relaciones que se anteceden a esta (predecesoras); o la suceden (sucesoras) de esta manera empieza la interacción entre actividades. Por lo general, las actividades de construcción se programan con duraciones de 1 día, que es el equivalente a un jornal de trabajo de 8 horas, dependiendo de las condiciones climatológicas y el régimen laboral están asociadas al consumo de tiempo.

2.1.3. Dependencia de actividades

2.1.3.1. Relación fin – inicio. La dependencia más utilizada entre dos actividades es la de relación F-I (fin – inicio). Este tipo de relación indica que “no puede empezar la actividad B hasta que A haya culminado”, un ejemplo de esta relación sería en la partida “pintura” si la actividad “A” es primera imprimante de pintura y la actividad “B” es pintura látex, la relación quiere decir que la mano de pintura látex “B”, no puede iniciar hasta que se haya secado el imprimante “A”, la relación se puede representar en la siguiente figura:

Figura 10

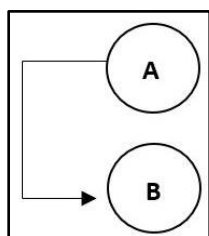
Diagramación de la secuencia fin - inicio



2.1.3.2. Relación inicio – inicio. Este tipo de relación indica que ambas actividades pueden empezar al mismo tiempo. La actividad A y B pueden empezar en simultáneo. Un ejemplo práctico de esta relación se encuentra en una obra de movimiento de tierras, la actividad de excavación manual puede empezar con la actividad excavación con maquinaria, en simultáneo.

Figura 11

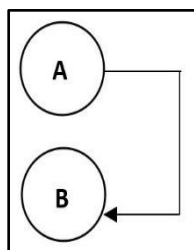
Diagramación de la secuencia inicio - inicio



2.1.3.3. Relación fin – fin. Las actividades A y B, deben terminar en simultáneo. Para este caso tenemos la habilitación de acero en la construcción de una columna y el armado de su respectivo encofrado, ambas actividades deben de estar culminadas para proceder con la actividad de vaciado de concreto, este tipo de relación se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 12

Diagramación de la secuencia fin - fin

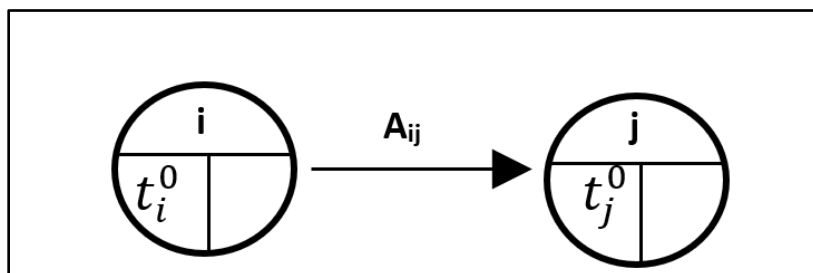


2.1.4. Duración temprana u optimista:

La duración más temprana se define al momento que una actividad puede comenzar sin afectar el proyecto.

Figura 13

Diagramación de los tiempos optimistas según la metodología CPM



t_i^0 = tiempo optimista para comenzar la actividad A_{ij}

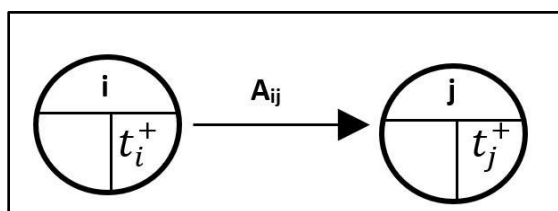
t_j^0 = tiempo optimista para terminar la actividad A_{ij}

2.1.5. Duración tardía ó pesimista

En forma análoga se define a la duración más tardía como el momento en el cual una actividad puede comenzar sin afectar el mismo.

Figura 14

Diagramación de los tiempos pesimistas según la metodología CPM



t_i^+ = tiempo pesimista para comenzar la actividad A_{ij}

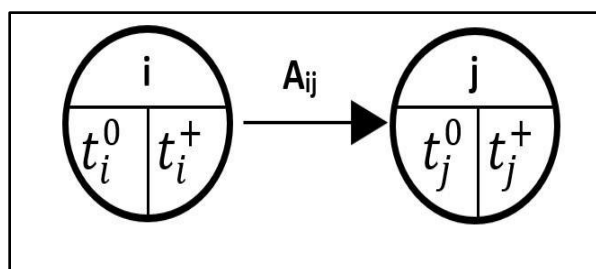
t_j^+ = tiempo pesimista para terminar la actividad A_{ij}

2.1.6. *Holgura o margen de actividad*

La holgura se define como la resta entre las duraciones más tempranas y la duración más tardías. Estos valores de las holguras dependiendo de su signo (+) o (-), definirán si las actividades pueden retrasarse o no sin afectar la duración total del proyecto.

Figura 15

Diagramación de la holgura según la metodología CPM



Cálculo de las Holgura= $t_j^+ - t_i^+$ y $t_j^0 - t_i^0$

2.1.7. *Actividad crítica*

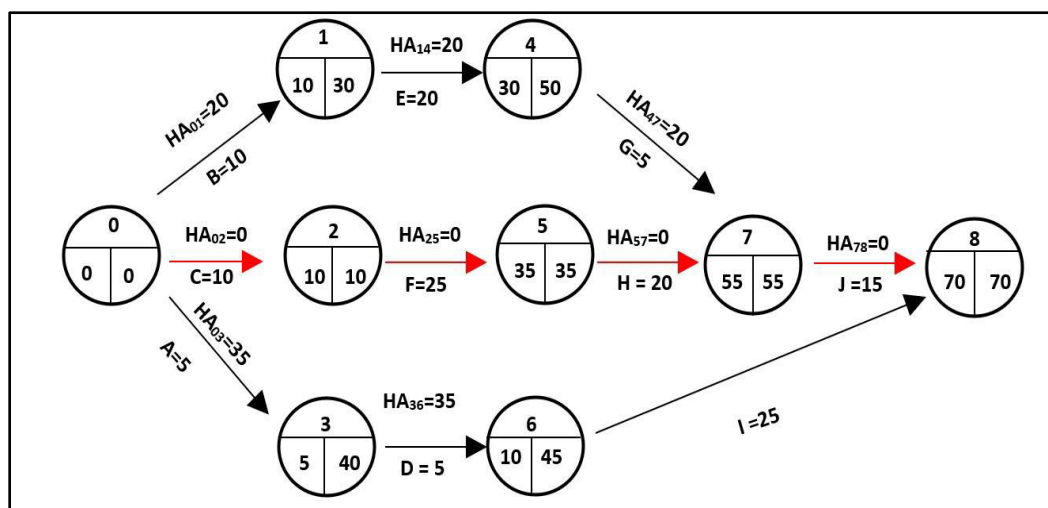
La concatenación de las actividades cuyas holguras son cero, serán denominadas actividades críticas y conformarán la ruta crítica, estas actividades no pueden retrasarse, de lo contrario impactará en la duración total del proyecto. Otra definición indica que la ruta crítica es la duración más larga y marca la duración total. Sin embargo, algo que es importante resaltar es que la ruta crítica no puede ser apreciada a simple vista, por lo que se debe realizar el cálculo respectivo.

Estimar la duración máxima y mínima a las actividades de construcción se convierte en una tarea que recae en la experiencia del programador, para estimar ambas duraciones se confía en sus experiencias pasadas, basando su estimación en su juicio experto, valorando en esta

estimación, contingencias, demoras, rendimientos, entre otros, siempre confiando en su práctica e intuición.

Figura 16

Diagramación de un proyecto según la metodología CPM



Como se puede apreciar las actividades C-F-H-J, forman parte de la ruta crítica del ejemplo mostrado líneas arriba, tal como se puede apreciar estas actividades tienen holgura cero. Es importante señalar que hay una diferencia entre actividades importantes y actividades críticas, por lo que en muchos casos alguna actividad que se puede considerar como “importante” no estará dentro de la ruta crítica.

2.1.8. Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt fue creado por Henry Laurence Gantt a mediados del siglo XIX. Gantt era un ingeniero industrial norteamericano que fue contratado en la Frederick W. Taylor para llevar a cabo la aplicación de los principios de la administración científica con su trabajo en Midvale Steel y Bethlehem Steel, desempeñó este trabajo hasta 1893. En su carrera como consultor

inventó el diagrama de Gantt, que es señalado como el primer trabajo científico relacionado con la programación de proyectos.

Gantt observó que las tareas se podían concatenar de manera visual en un gráfico de barras que representen el tiempo y que estas tengan un efecto de cascada, de manera tal que se dimensionaba de manera bastante empírica la duración del planeamiento de producción en los talleres.

Aplicándose esta metodología a la planificación de los procesos en fabricación en serie y en la producción por unidades. Su concepción bastante lógica y empírica permitía visualizar el avance de un programa y/o llevar a cabo la evaluación de un proceso.

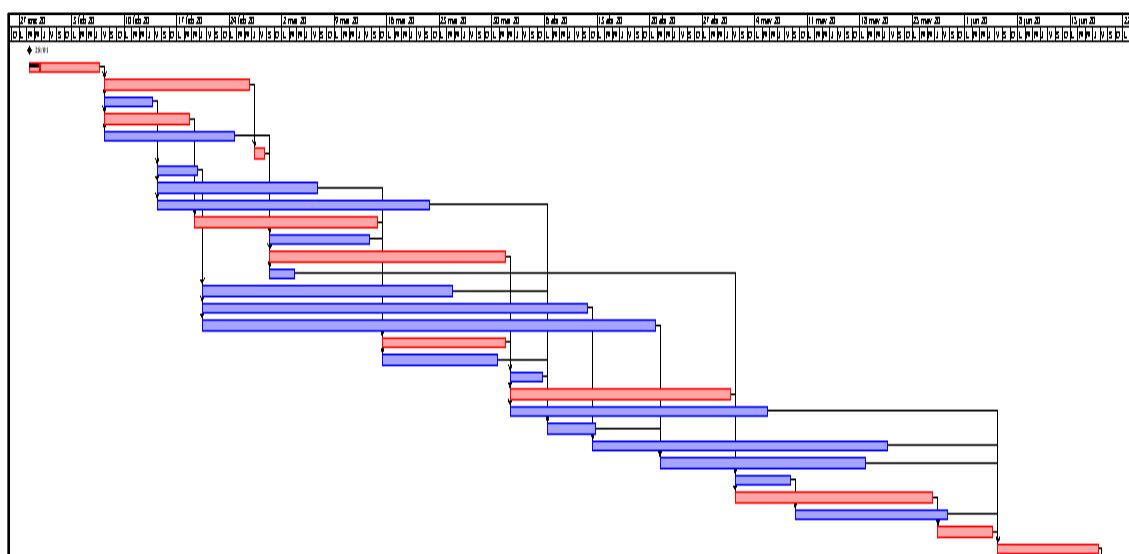
Existen algunos investigadores que le atribuyen el diagrama de barras al Ingeniero Karol Adamiecki, quien desarrollo el método mucho antes que Gantt, pero este debido a que fue publicado en polaco no tuvo mucha acogida por la barrera del idioma. Años más tarde Gantt modificaría el diagrama y lo presentaría en varias revistas científicas de la época, siendo immortalizado como el creador de la metodología. Este grafico de barras hasta el día de hoy es adoptado, utilizado y permanece como una excelente opción para la representación gráfica en la gestión de proyecto, debido a su facilidad de confección, siendo fácil de entender en todos los niveles de la gestión del proyecto. Uno de las características que experimenta el diagrama Gantt es el denominado “gloria temprana”, quiere decir que es fácil de entender al inicio, y a medida que pasan las semanas, su visualización se va complicando. Sin embargo, cabe resaltar que existen algunos aspectos que muestran que el grafico Gantt tiene sus ventajas y desventajas.

2.1.8.1. Ventajas. En su concepción original, este método de planificación clara de cómo planear, programar y controlar procesos productivos en forma sencilla.

2.1.8.2. Desventajas. El efecto de convergencia de actividades paralelas, no se advierte a simple vista en el diagrama Gantt, resultando complicado visualizar las relaciones de precedencia en el gráfico de barras, por lo que en muchos casos se debe recurrir a herramientas de apoyo.

Figura 17

Diagrama de barras o diagrama de Gantt



2.1.9. El CPM – Método de la ruta crítica

Metodología creada por los Ingenieros James E. Kelley Jr. y Morgan R. Walker a finales de los años 50. El gran aporte de CPM en la construcción es el de establecer el concepto de holguras de las actividades que forman parte del proyecto, calculando las actividades definidas con “cero holguras”, que son las actividades vitales del proyecto, las cuales no pueden retrasarse. En el libro “CPM in Construction Management” se despliega esta metodología, su aplicación y fundamentos. El método consiste en realizar una serie de cálculos para determinar el inicio y el fin de las actividades que conforman la malla de programación de los proyectos.

Para O'Brien (2006) el primer paso para la construcción de un modelo de planificación y programación es separar las funciones de planificación y programación. Definimos la planificación como el acto de establecer que actividades pueden ocurrir en el proyecto y en qué orden estas actividades deben ocurrir. En este caso solamente la tecnología y la secuencia fueron consideradas. Mientras que la programación seguida del planeamiento es definida como el acto de producir proyectos ejecutables considerando su tiempo y su costo.

EL CPM por basarse en la experiencia, solo considera las duraciones determinísticas en la estimación de las duraciones de las actividades, lo que impide hacer predicciones probabilísticas en los proyectos de mediano y largo plazo, por lo que se pueden indicar como desventajas las siguientes:

2.1.9.1. Desventajas. Los valores asignados por el método CPM, contemplan estimaciones optimistas de las duraciones de las actividades, en otras palabras, la duración está sujeta a una serie de actividades “perfectas”, subestimando sus duraciones.

2.1.10. El Método PERT (Program Evaluation and Review Technique)

Es una técnica estadística y modelo para la administración y gestión de proyectos ideado y aplicado en 1957, por los representantes de la Navy Special Projects Offices básicamente un método para analizar las tareas involucradas en completar un proyecto dado, identificando el tiempo mínimo, tiempo máximo y las holguras. Una de las primeras aplicaciones del PERT, fue en el desarrollo del proyecto Balístico Polaris de la armada de los Estados Unidos. Se pudieron controlar 250 contratistas directos y 9000 subcontratistas, y se contabilizaron cerca de 3000 actividades.

Es una metodología que trabaja con métodos probabilísticos que se basa en los siguientes principios:

2.1.10.1. Principio de designación sucesiva. Se nombra a los vértices según números naturales, de manera que no se les asigna número hasta que han sido nombrados aquellos de los que parten aristas que van a parar a ellos.

2.1.10.2. Principio de unicidad del estado inicial y final. Solo existe un único inicio y final.

2.1.10.3. Principio de designación univoca. No pueden existir dos actividades que tengan los mismos nodos de origen y de destino.

Figura 18

Proyecto Misil Balístico Polaris en donde se utilizó el método PERT



Nota: Adaptado del *programa Polaris* (fotografía), por US Navy, 1958, Va de Barcos (<https://vadebarcos.net/2021/02/27/el-desarrollo-de-los-misiles-polaris-y-la-tecnica-pert/>)

La metodología PERT incluye el cálculo de la duración estimada (T_e), para lo cual requiere conocer las siguientes duraciones que son proporcionada por profesionales expertos, los cuales definen los siguientes tiempos de acuerdo a su juicio:

- a= tiempo optimista
- m= tiempo más probable
- b= tiempo pesimista

Para calcular el tiempo estimado (T_e) se recurre a la siguiente formula:

$$T_e = \frac{(a + 4m + b)}{6}$$

De la misma manera se procede a calcular la varianza y la desviación estándar de cada actividad mediante la siguientes formulas:

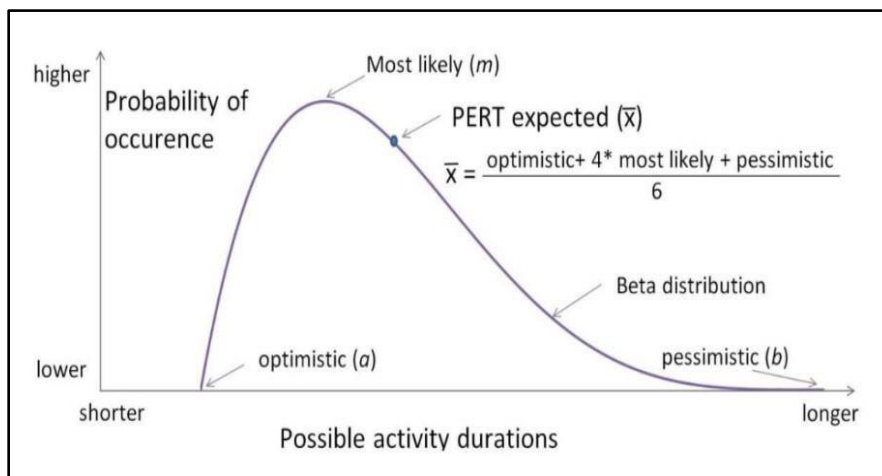
$$\sigma^2 = \left(\frac{b - a}{6}\right)^2$$

$$\sigma = \left(\frac{b - a}{6}\right)$$

Ahora bien, si procedemos a graficar estas duraciones en una curva de distribución probabilística, tendríamos el siguiente gráfico:

Figura 19

Función de probabilidad tipo Beta



2.1.10.4. Ventajas. Producción de planes realistas, detallados y de fácil difusión, que incrementan las probabilidades de alcanzar los objetivos del proyecto, centrando la atención en las partes críticas del proyecto

2.1.10.5. Desventajas. No considera importantes los costos de las actividades y por ende la utilización de los recursos, considerando resultados excesivamente optimistas.

2.1.11. Metodología PERT-CPM

Si bien es cierto, cronológicamente el método CPM fue el primero en aparecer en escena, hoy en día tanto el PERT y CPM, se les trata como una sola técnica fusionada en la planificación de proyecto, con sus ventajas y limitaciones. Esta metodología se sustenta en la representación de un plan de trabajo mediante un gráfico de nudos y flechas, basando su cálculo en métodos estocásticos. En todos los campos de la investigación, el conocer con exactitud la duración de los proyectos a priori, teniendo en cuenta todas las variables, es y ha sido una de las mayores incógnitas en la programación de los proyectos de construcción.

Las herramientas y las metodologías para medir la duración de los proyectos varían mucho dependiendo de la necesidad de la gerencia o del gestor del cronograma. Por ejemplo, existen cronogramas ligados a experimentos médicos de laboratorio cuyo cálculo se realiza utilizando la metodología de Montecarlo. Existen otros campos de la ingeniería en donde se utilizan otra metodología determinística para el cálculo del tiempo de la duración del proyecto.

Con el transcurrir de los años se han desarrollado paquetes informáticos comerciales que utilizan procedimientos de programación, o dicho en otras palabras no son más que softwares que permiten y facilitan a los gestores de proyectos, el cálculo del tiempo para la duración de proyectos.

La duración del proyecto obtenida de estos softwares o paquetes informáticos dependen en gran medida de los algoritmos intrínsecos en su concepción. Algunos paquetes conocen varios miles de reglas de prioridad; en general, es imposible predecir qué regla proporciona el mejor resultado para un proyecto determinado.

Nuestro país no ha sido la excepción, ya que estos sistemas de programación han sido estudiados y han sido impartidos en la universidad. ¿Pero surge la pregunta? ¿Estos métodos de programación, son verdaderamente eficientes? ¿Existe alguna otra metodología de programación que vaya acorde con la programación de obra?

¿Podríamos dudar o poner en tela de juicio estos sistemas, que tienen más de 60 años de vigencia?

Sobre la vigencia de la validez de la metodología PERT un reconocido profesor en el campo de la investigación de operaciones plantea la siguiente pregunta. Sasieni (1986) “Como surgió la historia de la distribución Beta para PERT y porque los autores la han repetido durante 25 años sin verificarla?”.

2.1.12. Simulación de Montecarlo:

La simulación de Montecarlo es una herramienta estadística que mediante el apoyo de una computadora recrea y simula mediante modelos matemáticos un comportamiento que algunas variables (ya sean discretas o continuas) varíen en el transcurso del tiempo. Esta simulación permite mejorar la toma de decisiones ante situaciones inciertas, el nombre del método se debe a la ciudad de Mónaco, distinguida por sus ruletas de casino.

Este método consiste en generar una serie de posibles resultados para posteriormente crear un modelo de distribución de probabilidad que permita que la variable a ser analizada pierda incertidumbre.

En el presente trabajo la simulación de Montecarlo será utilizada para las estimaciones de tiempo y costo de las tareas que forman parte de la planificación del proyecto, las cuales están sujetas a variabilidad.

Las actividades a priori no tienen un costo y duración definida, debido a que no sabemos con exactitud cuanto durarán y cuanto costarán. De manera que lo más conveniente es asignar un valor medio a ambas variables y decir que probabilidad hay de que se materialice un riesgo detectado en el proyecto. Una vez definido el grado de confianza y luego de haber definido nuestra programación como factible, podemos aplicar el método de Montecarlo de lo contrario tendríamos que modificar y volver a utilizar el método hasta llegar a una programación adecuada.

2.1.13. Convergencia de rutas paralelas - Merge Event Bias

El efecto “Merge event Bias” que para fines de esta investigación se ha traducido como efecto de convergencia de rutas paralelas, fue siempre una interrogante que surgió ante la pregunta si el método PERT-CPM era una metodología demasiado optimista que no consideraba los riesgos asociados a lo que realmente sucede en la ejecución de un proyecto.

Este efecto, desde entonces fue ampliamente estudiado y analizado por la comunidad científica, proponiendo algunas metodologías que buscaban “corregir” el error de sesgo propuesto en PERT-CPM.

Respecto a las limitaciones acerca de las metodologías convencionales PERT – CPM, Hullet (2008) señala que:

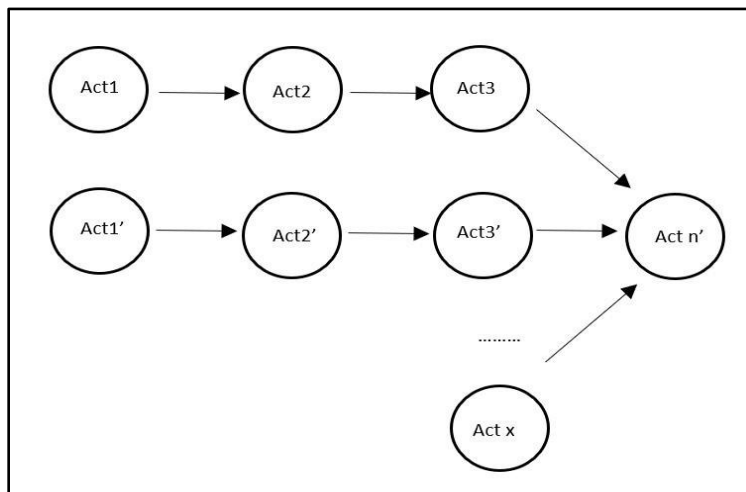
La metodología PERT-CPM no brinda una respuesta adecuada en los proyectos donde hay convergencia de rutas paralelas, no reconociendo este crucial efecto, dicha metodología convencional PERT-CPM no tiene en cuenta que la ruta crítica puede variar a medida que se va ejecutando el proyecto. La esencia del análisis de riesgos es que cada ruta, cada actividad, cada punto de convergencia combinada con la diagramación de la malla es incierta. (p.100)

Es de señalar que existen distintas herramientas y procedimientos estadísticos que han buscado “corregir” el efecto de convergencia entre ellos tenemos el procedimiento BFUE (Back – Forward Uncertainty – Estimation, que para efectos de la investigación será traducido como “estimación de la incertidumbre de atrás - adelante), y el algoritmo PNET (Probabilistic Network Evaluation Technique, traducido como “técnica de evaluación probabilística de las redes de programación), siendo el más conocido el de la simulación de Montecarlo.

En ese sentido, se presenta de manera gráfica como es que se visualiza el efecto de convergencia de actividades en una malla de programación de proyectos, la que se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 20

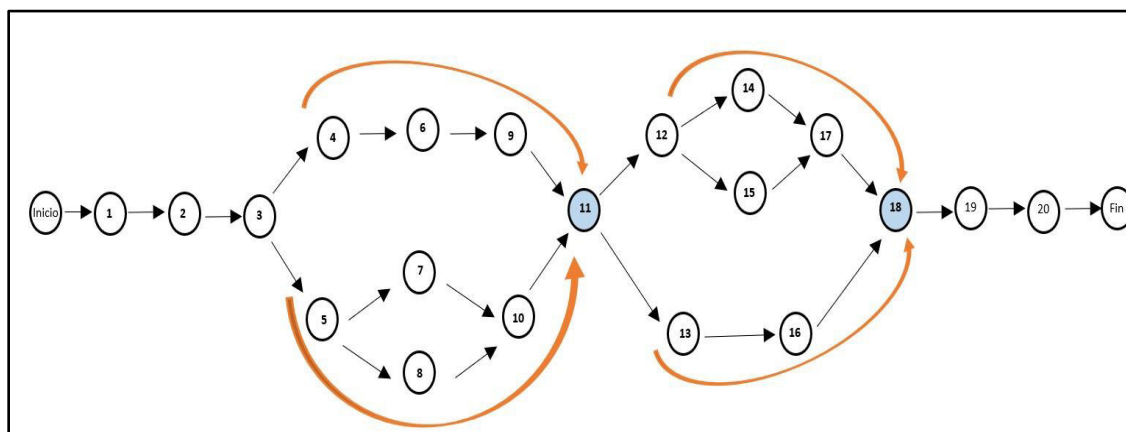
Ejemplo de convergencia de rutas paralelas



La figura 21 corresponde a una red de 20 actividades, se puede visualizar dos rutas paralelas que convergen en la actividad 11, y dos rutas paralelas que convergen en la actividad 18. Este es un claro ejemplo de cómo se pueden apreciar gráficamente la convergencia de las rutas paralelas.

Figura 21

Malla de programación de proyectos con rutas paralelas convergentes



En este estudio se pretende demostrar que los proyectos con presencia de múltiples rutas paralelas presentan más probabilidad de exceder el plazo de ejecución, que los proyectos que no las presentan.

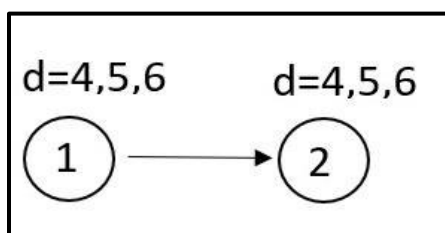
Ahora bien, luego de presentar como se visualiza gráficamente el efecto de convergencia, procederemos con dos ejemplos numéricos.

Proyecto n° 1. Consta de 2 actividades en serie, con un rango de variación de 4, 5 y 6 días para ambas actividades (Ver figura 22).

Proyecto n°2 con las mismas 2 actividades, pero arregladas de manera paralela y que converge en otra actividad de duración fija de 5 días (Ver figura 23).

Figura 22

Proyecto n°1 con actividades en serie



Procedemos a realizar 10 simulaciones, seleccionando distintas duraciones de manera aleatoria para las actividades 1 y 2, tal como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 3

Simulaciones para el cálculo de la duración del proyecto

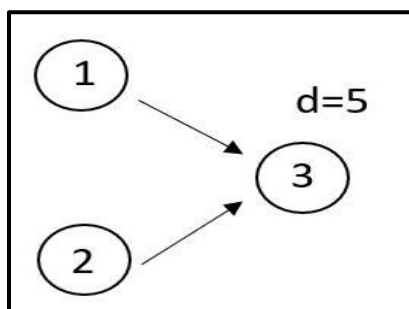
N° simulaciones	Act1	Act2	Duración del proyecto n.º1 (Actividades en serie)
Nº1	4	6	10
Nº2	5	5	10
Nº3	6	4	10
Nº4	6	5	11
Nº5	5	6	11

N°6	4	4	8
N°7	5	5	10
N°8	6	4	10
N°9	4	5	9
N°10	4	4	8
Promedio			9.70

Nota: Tomando el promedio aritmético de las 10 iteraciones, obtenemos el valor de 9.70 días como la duración del proyecto n°1.

Figura 23

Proyecto n°2 con actividades en paralelo



De la misma manera procedemos a realizar 10 simulaciones, seleccionando distintas duraciones para las actividades 1 y 2, pero esta vez se tiene la actividad 3 tal como se puede apreciar en el siguiente cuadro:

Tabla 4.

Simulaciones para el cálculo de la duración del proyecto

N° simulaciones	Act1	Act2	Act3	Duración proyecto 2 (Actividades en paralelo)
N°1	4	6	5	11
N°2	5	5	5	10
N°3	6	4	5	11
N°4	6	5	5	11
N°5	5	6	5	11
N°6	4	4	5	9
N°7	5	5	5	10
N°8	6	4	5	11
N°9	4	5	5	10
N°10	4	4	5	9
Promedio				10.30

Nota: Tomando el promedio aritmético de las iteraciones, obtenemos el valor de 10.30 días como la duración. Por lo tanto, sintetizando los promedios de los proyectos n° 1 y n° 2 tenemos la consolidación en la tabla n°5.

Tabla 5*Consolidación de resultados*

	Proyecto 1 (Actividades en serie)	Proyecto 2 (Actividades en paralelo)
Duración	9.70 días	10.30 días
%	100%	106.18%

Nota: La duración de un proyecto con la presencia de actividades paralelas, tiende a ser mayor a un proyecto con actividades en serie, excediéndolo en este caso en un 6.18%.

Esta es la razón por la cual proyectos complejos con múltiples rutas paralelas presentan un mayor riesgo de no culminar la ejecución en el tiempo indicado, situación que pasa inadvertida con la metodología PERT-CPM.

La cuantificación de la cantidad de rutas paralelas en una red de programación de un proyecto de construcción, pueden ser calculado mediante la aplicación de los indicadores topológicos, los cuales se muestran a continuación.

2.1.14. Topología de las redes de programación de proyectos

El presente trabajo plantea el cálculo de (4) cuatro indicadores topológicos, que reflejan características intrínsecas, que poseen las redes de programación de proyectos. Estos indicadores, permiten reconocer si las redes de programación de proyectos presentan o están influenciadas por el efecto de convergencia de actividades paralelas.

Estos indicadores son los siguientes:

2.1.14.1. Indicador serie – paralelo (SP - Serial Parallel). Este el indicador es el más importante para efectos de nuestra investigación, le brinda un valor a toda la red de programación, en función a la cantidad de arreglos de las actividades que la conforman y su tendencia, ya sea en paralelo o en serie. Si el valor del indicador es igual a cero (SP=0), significa que la red contiene rutas con actividades arregladas en paralelo, si el SP es igual a 100% (SP=100%), significa que la red contiene rutas con actividades arregladas en serie.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$SP = \frac{(m - 1)}{(n - 1)}$$

Donde:

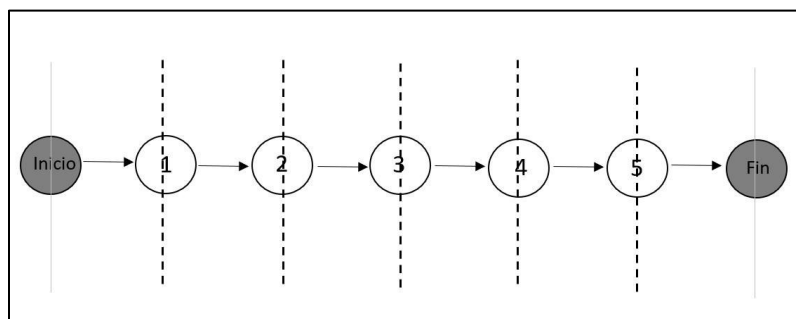
m= número de ejes verticales (no se toman en cuentan los ejes del inicio, ni del fin)

n= número total de actividades

Vamos a realizar un cálculo a manera de ejemplo de la siguiente red que consta de 5 actividades (Ver figura 24).

Figura 24

Red de programación con actividades arregladas en serie



Como se mencionó líneas arriba no se toma en cuenta los ejes del inicio y fin, por lo que contabilizamos 5 ejes y 5 actividades

Reemplazando los valores en la formula, tenemos para este ejemplo $m=5$; $n=5$:

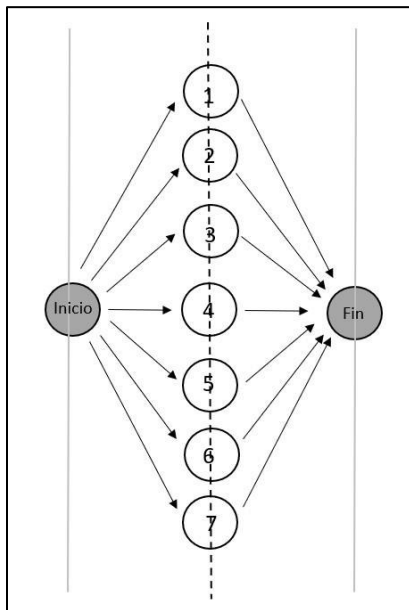
Por lo tanto, tenemos una red de distribución completamente en serie.

$$SP = \frac{(m-1)}{(n-1)} = \frac{(5-1)}{(5-1)} = \frac{4}{4} = 100\%$$

Del mismo modo, procederemos ahora a calcular el indicador topológico SP para la red de programación de la figura 25.

Figura 25

Red de programación de proyecto con actividades en paralelo



Reemplazando los valores en la formula, tenemos para este ejemplo $m=1$; $n=7$

$$SP = \frac{(m-1)}{(n-1)} = \frac{(1-1)}{(7-1)} = 0\%$$

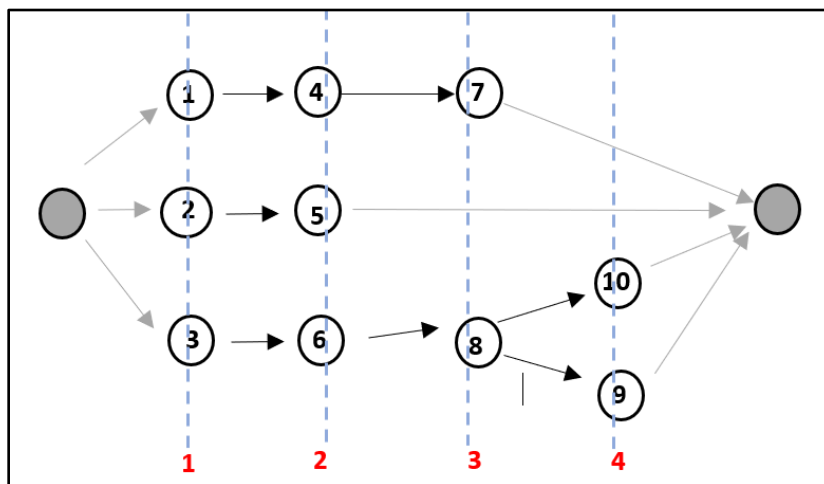
El presente ejemplo indica que la red de programación contiene todas sus actividades en paralelo.

Es de indicar que los cálculos de las redes precedentes se realizaron con la intención de mostrarle al lector, los casos en los que los valores son extremos. En la práctica este valor fluctúa entre 0% y 100%, asociándose más que todo a la tendencia que una red puede presentar.

A continuación, procederemos al cálculo del indicador SP en una red de programación de la figura 26.

Figura 26

Red de programación de actividades de un proyecto



Reemplazando los valores en la formula, tenemos:

$$SP = \frac{(m - 1)}{(n - 1)} = \frac{(4 - 1)}{(10 - 1)} = \frac{3}{9} = 33\%$$

El valor calculado de SP equivalente al 33%, indica que la red tiene una tendencia de distribución de las actividades en paralelo, situación que se puede apreciar a simple vista observando la figura 26.

2.1.14.2. Indicador Distribución de actividades (AD – Activity Distribution). Es el indicador que mide la consistencia de la distribución de las actividades de la red de programación. Si el indicador AD es igual a cero (AD=0), significa que existe una distribución homogénea de las actividades a lo largo de todos los niveles de la red, mientras que para valores de AD=100%, se tiene una distribución en la cual no hay una homogenización en los distintos niveles de la misma. La fórmula es la siguiente:

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_{\max}} = \frac{\sum_{a=1}^m |w_a - \bar{w}|}{2(m-1)(\bar{w}-1)}$$

Para el cálculo del indicador AD, necesitamos los siguientes datos:

m= número de ejes verticales (no se toman en cuenta los ejes del inicio, ni del fin)

n= número total de actividades

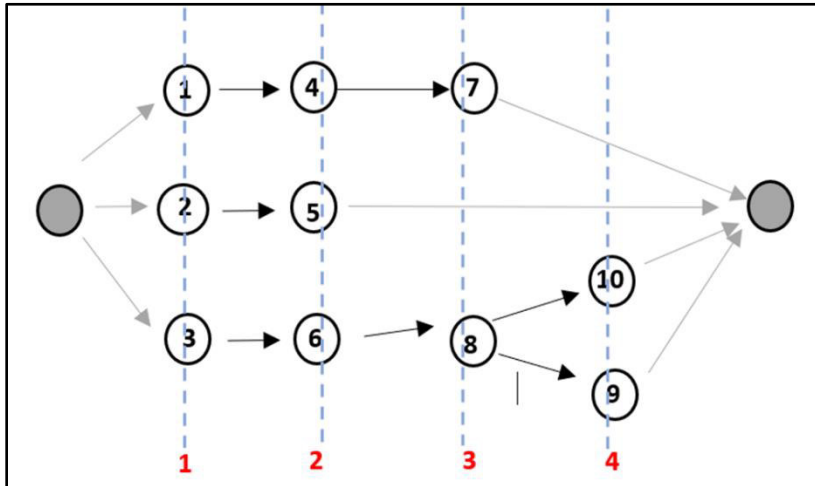
$$\bar{w} = \frac{n}{m}$$

w_a = número de actividades en el eje $a = \{1, 2, 3 \dots\}$

Calculando el valor de AD, para el siguiente proyecto:

Figura 27

Red de programación de actividades de un proyecto



De la siguiente red, tenemos los valores:

$$m = 4$$

$$n = 10$$

$$\bar{w} = \frac{10}{4} = 2.5$$

$$w_1 = 3 \text{ actividades}$$

$$w_2 = 3 \text{ actividades}$$

$$w_3 = 2 \text{ actividades}$$

$$w_4 = 2 \text{ actividades}$$

Para un mejor entendimiento, colocamos los valores en una tabla:

Tabla 6

Consolidación de resultados

w_a	$\bar{w}$	$ w_a - \bar{w} $
3	2.5	0.5

3	2.5	0.5
2	2.5	0.5
2	2.5	0.5
Σ		2.00

Reemplazando los valores en la formula, tenemos:

$$AD = \frac{2.00}{2 \cdot (4 - 1) \cdot (2.5 - 1)} = \frac{2}{9} = 0.22 = 22\%$$

En este caso el valor calculado de 22% indica que la red de la programación posee una distribución homogénea de sus actividades, por consiguiente, existe la potencialidad de la aparición de varias rutas. De la experiencia se ha demostrado que para valores AD superiores a 50%, se tiene que existe una ruta preponderante conteniendo la mayor cantidad de actividades que otras rutas.

2.1.14.3. Indicador longitud de arcos (LA – Length of Arcs). Es el indicador que mide el grado de precedencia sucesivas entre las actividades. Si LA=1, significa que todas las actividades tienen una relación de precedencia sucesivas, mientras que para valores de LA=0, la red presenta relaciones de precedencia entre distintos niveles de la malla. La fórmula es la siguiente:

$$LA = \frac{n'_1 - n + w_1}{D - n + w_1}$$

Para el cálculo del indicador LA, necesitamos los siguientes datos:

n'_1 = número de precedencias sucesivas

n = número de actividades

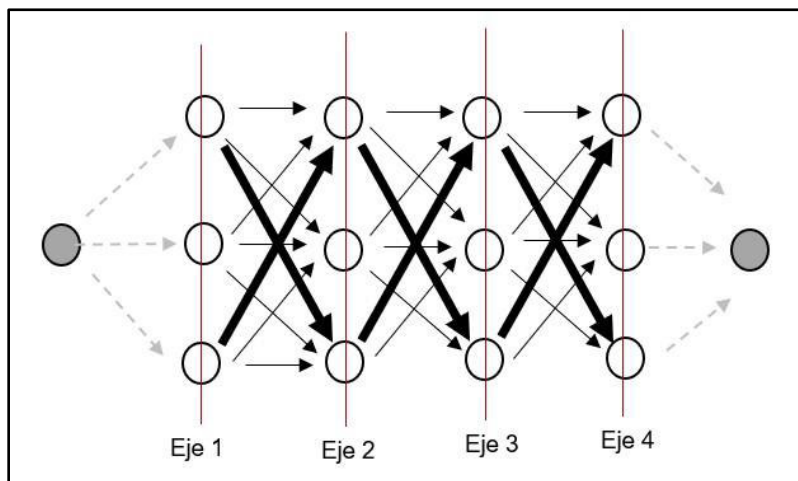
w'_1 = número de actividades en el eje 1

$D = (\text{act. eje 1} \times \text{act. eje 2}) + (\text{act. eje 2} \times \text{act eje 3}) + (\text{act eje 3} \times \text{act eje 4}) + (\text{act eje "n-1"} \times \text{act eje "n"})$

Calculamos el valor de LA del siguiente proyecto de la figura 28.

Figura 28

Cálculo del indicador LA del proyecto



De la malla obtenemos los siguientes valores:

$$\begin{array}{ll}
 n'_1 = 27 & D = \quad n^\circ \text{ act eje 1 } \times n^\circ \text{ act eje 2 } \rightarrow 3 \times 3 = 9 + \\
 n = 12 & \quad n^\circ \text{ act eje 2 } \times n^\circ \text{ act eje 3 } \rightarrow 3 \times 3 = 9 + \\
 w'_1 = 3 & \quad \underline{n^\circ \text{ act eje 3 } \times n^\circ \text{ act eje 4 } \rightarrow 3 \times 3 = 9 +} \\
 & \quad \quad \quad = 27
 \end{array}$$

Reemplazando los valores en la formula, tenemos:

$$LA = \frac{27 - 12 + 3}{27 - 12 + 3} = 1.00$$

Para valores de LA=100%, todas las actividades de la red de programación están relacionadas con precedencias sucesivas, para valores de LA menores a 10%, indican que la red de programación tiene bajo grado de relaciones sucesivas.

2.1.14.4. Indicador Topología Flotante (TF – Topologycal Float). Se refiere a los grados de libertad, que poseen las actividades en los distintos ejes de la red de programación. La fórmula es la siguiente:

$$TF = \frac{\sum_{i=1}^n (RL_i - PL_i)}{(m - 1)(n - m)}$$

Para el cálculo de este indicador, se necesitan los siguientes datos:

RL_i= Nivel regresivo

PL_i= Nivel progresivo

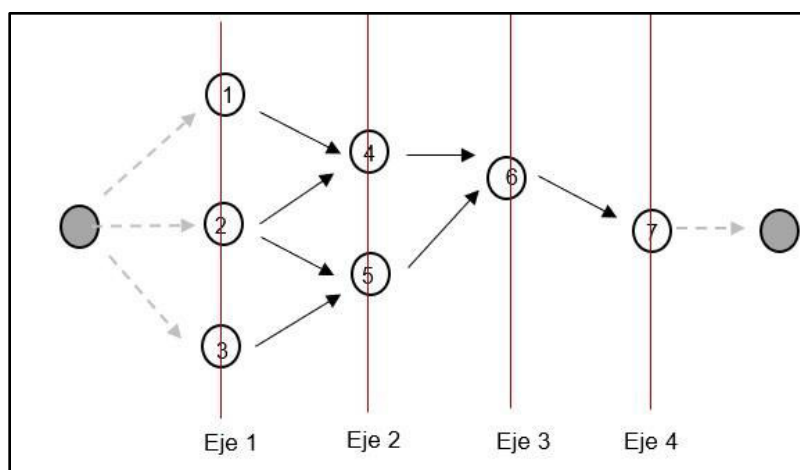
m= número de ejes

n= número de actividades

Calculamos el indicador TF a la red de programación de la figura 29.

Figura 29

Cálculo del indicador TF del proyecto



De la malla obtenemos los siguientes valores:

RL_i = Nivel regresivo

PL_i = Nivel progresivo

$m = 4$

$n = 7$

Para un mejor entendimiento del nivel regresivo y el nivel progresivo, confeccionamos la siguiente tabla:

Tabla 7

Tabla de cálculo de topological float (TF)

Actividad	Predecesor	Nivel progresivo (PL_i)	Nivel regresivo (RL_i)	$RL_i - PL_i$
1	-----	1	1	0
2	-----	1	1	0
3	----	1	1	0

4	1,2	2	2	0
5	2,3	2	2	0
6	4,5	3	3	0
7	6	4	4	0
Σ				0

Reemplazando los valores en la formula, tenemos:

$$TF = \frac{0}{(4 - 1)(7 - 4)} = 0$$

Para valores de TF=0%, las actividades presentan nulo grado de libertad para relacionarse con otras actividades.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

El tipo de la investigación es aplicada, debido a que el presente trabajo está orientado a dar solución a un problema planteado, utilizando herramientas de la investigación básica.

De acuerdo a la definición de Tamayo (2003) se extrae que:

A la investigación aplicada se le denomina también activa o dinámica, y se encuentra íntimamente ligada a la investigación básica, ya que depende de sus aportes y descubrimientos teóricos. Busca confrontar la teoría con la realidad.

Es el estudio y aplicación de la investigación a problemas concretos, en circunstancias y características concretas. Esta forma de investigación se dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teorías. (p. 43).

El tipo de diseño es no experimental, debido a que el investigador recurre a fuentes de base de datos de proyectos ejecutados, por lo que no tuvo la necesidad de manipular ningún tipo de variable.

El nivel de investigación seleccionado para este estudio es descriptivo – correlacional, ya que a nivel descriptivo busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis, a medida que busca conocer el grado de relación que existe entre 2 o más conceptos o categorías en un contexto particular. (Hernández-Sampieri et al., 2014)

Por esta razón se plantea que, el nivel de investigación sea de tipo descriptivo – correlacional, debido a que se llevará a cabo la evaluación experimental estableciendo una muestra

conformada por proyectos de obras públicas, analizando las características de sus redes de programación, para posteriormente relacionarlo con el tiempo de ejecución del mismo.

El tipo de investigación es cuantitativo y cualitativo, debido a que utiliza sus diseños para analizar la certeza de las hipótesis formuladas en un contexto en particular o para aportar evidencias respecto de los lineamientos de la investigación. (Tamayo, 2003)

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población estudiada está conformada por las obras públicas ejecutadas durante los años 2021 al 2024 en el territorio peruano, bajo la modalidad de administración indirecta (por contrata). Este universo identificado corresponde a obras ejecutadas en los 3 niveles de gobierno (nacional, regional y local).

Dicha evaluación se realizará utilizando data del aplicativo público proporcionado por la Contraloría General de la República, denominado INFObras, herramienta que compila a todas las obras ejecutadas en cada departamento del país, como fuente de información anexa se utilizó la plataforma del sistema electrónico de contrataciones con el estado (SEACE), el buscador público del cuaderno de obra digital y finalmente el sistema de seguimiento de inversiones (SSI), todas de acceso público y respaldadas por el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF).

3.2.2. Muestra

En relación a la muestra definimos que. “Es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos, y que tiene que definirse y delimitarse de antemano con precisión, además que debe de ser representativo de la población” (Hernández Sampieri et al., 2014, p. 173)

Para el cálculo del tamaño de la muestra probabilística se aplicó la siguiente fórmula para población finita, de acuerdo a los siguientes parámetros de la formula:

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}$$

Siendo:

$$N \text{ (n° obras)} = 11,318$$

$$Z_{\alpha} = \text{Nivel de confianza al 95\%} = 1.96$$

$$p = \text{ocurrencia positiva} = 0.50$$

$$q = \text{ocurrencia negativa} = 0.50$$

$$e = \text{nivel de error 5\%} = 0.05$$

Reemplazando los valores en la formula, tenemos:

$$n = \frac{11,318 \times 1.96^2 \times 0.50 \times 0.50}{0.05^2 \cdot (11,318) + 1.96^2 \times 0.50 \times 0.50}$$

Obteniendo un valor de **150** proyectos.

Se realizó un muestreo estratificado por racimos, quiere decir de manera aleatoria se seleccionaron las obras, que forman parte de la muestra, esto con el objetivo de realizar observaciones en la mayoría de distritos del Perú, con la finalidad de que se obtenga la muestra más representativa posible.

3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 8

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
Efecto de convergencia de rutas paralelas	V1. Características intrínsecas de la programación de la obra	Indicador serie - paralelo (SP)
		Análisis de Montecarlo
		Nº de rutas de paralelas
	Impacto en tiempo y costos de los proyectos de construcción de obra pública	V1. De tiempo
Distribución de las actividades que conforman la malla de la obra		
V2. De costos		Fecha de finalización contractual.
		Fecha de finalización real
	Costo contratado entre el contratista y la entidad	
		Costo final contractual
		Costo final real

3.3.1. Variable independiente.

Para el presente trabajo de investigación se considera como variable independiente el efecto de convergencia de actividades (Merge Event Bias). Su aplicación permitirá evaluar el impacto de este efecto en el cronograma de los proyectos de construcción de las obras públicas.

3.3.2. *Variable dependiente.*

Se considera como variable dependiente el impacto en tiempos y costos en los proyectos de construcción, por lo que se definen los siguientes indicadores:

- Presupuesto final del proyecto (costo real).
- Tiempo de ejecución final del proyecto (tiempo real).

3.4. Instrumentos

El instrumento elegido para este propósito, teniendo como premisa que el diseño fue no experimental, consistió en la recopilación de documentos primarios, técnicas documentales), obteniendo la información técnica, actas, reportes, fichas, cartas referidas a la ejecución física y financiera de los proyectos que formaron parte de la muestra. Esta base de datos fue esquematizada en una hoja de cálculo, y fue el insumo principal para la confección de los cuadros estadísticos, registros, categorizaciones.

Finalmente, esta base de datos, fue validada y optimizada, retirando los datos espurios e inconsistentes. Una vez validada la base de datos, se procede al análisis de la misma, para su posterior confección de los indicadores.

3.5. Procedimientos

El Programa MS Project será utilizado como herramienta analítica para el procesamiento de los proyectos de obras públicas. Este software permite el análisis de las mallas de programación de los proyectos, los cuales han sido descargados de la base de datos de SEACE, en extensión (.mpp) compatibles solamente con este programa. Se procedió a extraer las variables relevantes de cada proyecto en categorías previamente establecidas tales como (fecha de inicio, fecha fin, actividades predecesoras, actividades sucesoras, líneas base, costos, duración de línea base, etc.).

Las hojas de cálculo se utilizarán como herramienta complementaria para el procesamiento, y presentación de los datos obtenidos.

3.6. Análisis de datos

Se procederá al cálculo de los indicadores topológicos de las redes de programación de proyectos, utilizando la metodología patentada por el Dr. Mario Vancoucke.

Luego del análisis, se revisará y actualizará la estructura modular propuesta con las obras seleccionadas.

Finalmente, los resultados serán presentados en cuadros estadísticos, presentando y sintetizando los hallazgos obtenidos.

3.7. Consideraciones éticas

La presente tesis se realizó considerando los siguientes aspectos éticos:

- 3.7.1. Se han seguido los lineamientos establecidos en el formato proporcionado por la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Federico Villarreal, para la confección de la presente tesis.

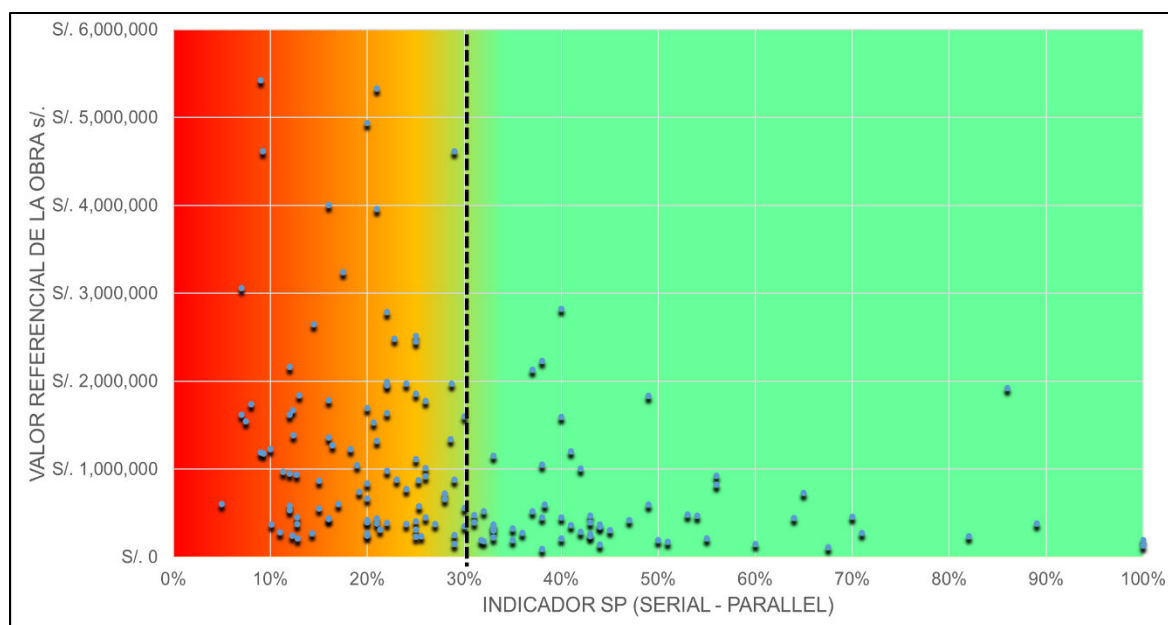
- 3.7.2. El objetivo primordial de la tesis es el despliegue de nuevo conocimiento, aplicando la teoría propuesta a proyectos reales ejecutados en nuestro país.
- 3.7.3. Los resultados presentados son genuinos, no habiendo manipulado, ni tergiversado ninguno de ellos.
- 3.7.4. Se ha citado debidamente a los autores, reconociendo y respetando su producción científica.
- 3.7.5. El trabajo de investigación se realizó siempre respetando la originalidad de la misma, aplicando la metodología del Dr. Mario Vancoucke a proyectos reales ejecutados en el territorio peruano.

IV. RESULTADOS

De manera esquemática, se representará cada proyecto en un mapa de calor (con un eje de abscisas y ordenadas) en donde se tendrá como valor intermedio el $SP=0.3$, en este esquema apreciaremos de manera gráfica, la tendencia que tienen las mallas de programación de obras públicas.

Figura 30

Mapa de calor índice (SP) vs valor referencial de la obra (S/.)



Nota: De la figura precedente, se obtuvieron que 91 obras se agruparon en la parte izquierda del mapa de calor, en donde los valores de SP fluctúan desde 0 hasta 0.3 (presencia del efecto de convergencia y alto riesgo de las obras de ser entregadas fuera del plazo y/o costo).

Mientras que, las 59 obras restantes, presentan valores por encima del 0.3 (no hay presencia del efecto de convergencia y hay un bajo riesgo de que la obra sea entregada fuera de sus plazos y sus costos). Señalar además que el efecto de convergencia es transversal a cualquier tipo de proyecto sin importar el valor referencial de la obra.

En la tabla 9, tenemos la esquematización porcentual para su mejor entendimiento, obteniendo que el 39% de los proyectos, poseen un valor $SP > 0.3$, que significa menor riesgo de culminar fuera de su plazo y fecha. Mientras que el 61% presentan valores de $SP < 0.3$, lo cual indica que estos proyectos representan un alto riesgo de no culminar dentro de su plazo y/o costo establecido.

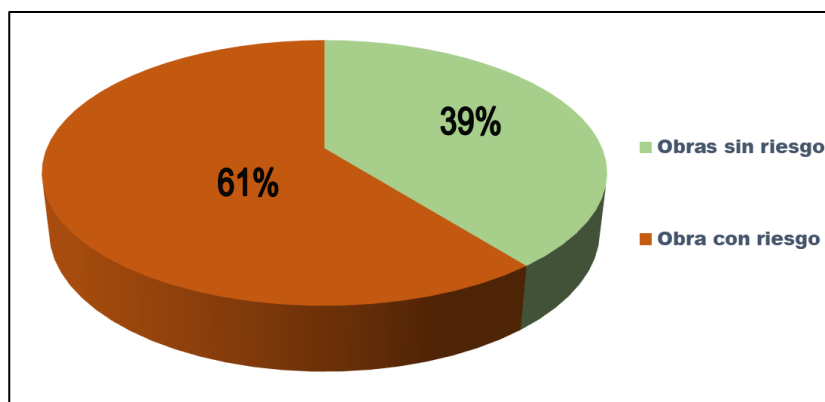
Tabla 9

Distribución de los proyectos analizados según su índice SP

Indicador SP	n° proyectos	Porcentaje (%)	Clasificación
SP>0.3	59	39%	Bajo riesgo
SP<0.3	91	61%	Alto riesgo
Total	150	100%	

Figura 31

Distribución de los proyectos analizados



En la figura 31 y la tabla 9 se aprecia, que 91 obras del total de la muestra (61%) han incurrido en sobrecostos o sobretiempo. Así mismo se aprecia que las 59 obras restantes, que equivalen al 39%, no han sufrido variación respecto de su monto contratado, ni en su plazo de ejecución.

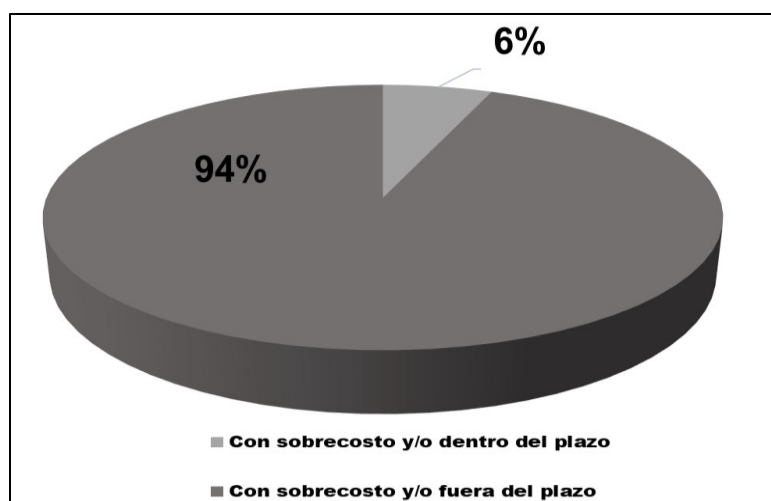
Tabla 10

Clasificación de las obras con riesgo en 2 subgrupos

n° proyectos	Porcentaje (%)	Clasificación
5	6%	Con Sobrecosto y/o dentro del plazo
86	94%	Con Sobrecosto y/o fuera del plazo
91	100%	

Figura 32

Distribución de los proyectos con riesgo en %



En la figura 32 y la tabla 10, se han agrupado las obras con riesgo en 2 subgrupos, el primero aglutina 86 obras que fueron entregadas con sobrecosto y/o fuera del plazo contractual, (94%), mientras que el segundo subgrupo corresponde a 5 obras, que representa el (6%), los cuales no han sufrido variación respecto de su plazo contractual.

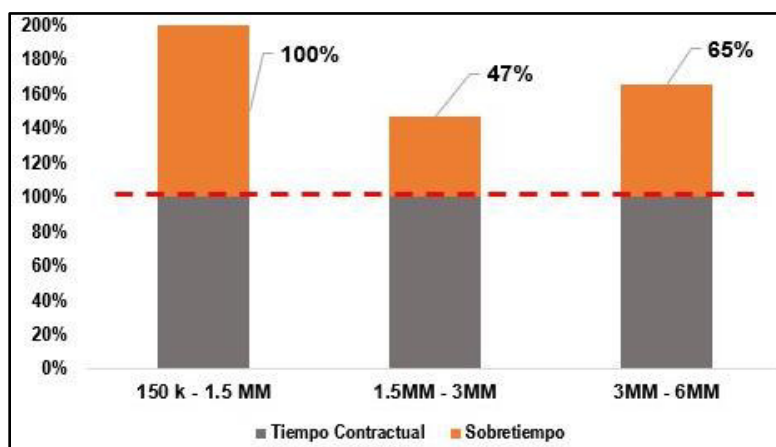
Tabla 11

Valores de los indicadores SP, AD, LA, TF en promedio

n° proyectos	Valor SP promedio (%)	Valor AD promedio (%)	Valor LA promedio (%)	Valor TF promedio (%)	Clasificación
91	19%	35%	39%	16%	Proyectos con riesgo
59	48%	59%	12%	52%	Proyectos sin riesgo
150					Total

Figura 33

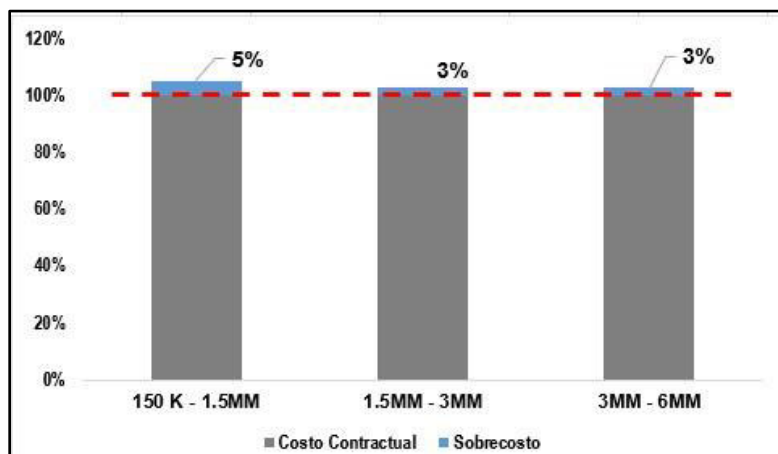
% Sobretiempo de acuerdo al rango del proyecto



Nota: En la figura 34, se aprecia que proyectos dentro del rango entre 150,000 soles y 1.5 MM de soles tienen una excedencia del 100% en tiempo, sobre su duración original. Por otro lado, los proyectos entre S/ 1.5 MM soles y 3 MM excedieron sus valores en tiempo en un porcentaje de 47%. Por último, las obras con valores entre S/ 3MM a S/. 6MM presentan sobretiempos de valores hasta 65% con respecto a su duración original.

Figura 34

% Sobrecostos de acuerdo al rango del proyecto



Nota: En la figura 34, se aprecia que proyectos dentro del rango entre 150,000 soles y 1.5 MM de soles tienen un sobrecosto de 5% sobre su valor referencial. Así mismo, los proyectos con valores referenciales entre S/. 1.5 MM a S/. 6MM, presentan un 3% de sobrecosto sobre su valor referencial original.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Para Vancoucke (2019) el propósito fundamental de esta metodología es advertir acerca de la importancia en mayor o menor medida de la presencia de rutas paralelas en la programación de las obras publicas de construcción y su efecto al momento de su convergencia.
- 5.2. De acuerdo a los datos analizados en la presente tesis, se concluyó que existe una correlación significativa entre el incremento de la convergencia de rutas paralelas en los proyectos de construcción de obras públicas y el riesgo de que se amplie su plazo de ejecución y el costo final del proyecto.
- 5.3. En la presente tesis se concluyó además que, cerca del 60% del total de los proyectos que formaron parte del análisis presentan un índice $SP < 30\%$, que equivale a decir que los proyectos de construcción de obras públicas en el Perú, contienen un alto número de actividades en paralelo, en donde el efecto de convergencia tiene mayor impacto, esto sumado al hecho que se analizan deterministamente (vale decir no concibe la idea de la volatibilidad de las rutas criticas), situación que permite que el riesgo de no concluir el proyecto dentro de su fecha y costo inicial, se vea incrementado.
- 5.4. En resumen, la presente tesis proporciona al lector una herramienta poderosa de como aplicando esta metodología se puede, conocer más a detalle la información que se puede extraer de las mallas de la programación de proyectos, y de esta manera dimensionar el riesgo de cumplir con la ejecución de los proyectos de construcción

VI. CONCLUSIONES

- 6.1. Luego de la exposición de los resultados, concluimos que las obras de construcción públicas son afectadas en gran medida por el efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas, los cuales no son advertidos por los procedimientos convencionales de las redes de programación de proyectos (Método PERT – CPM), ya que estos solo consideran una sola ruta crítica.
- 6.2. La convergencia de rutas paralelas en actividades individuales, es el insumo principal que genera el desarrollo de la presente tesis, efecto que no ha prestado suficiente atención.
- 6.3. Se evidenció que el grupo de obras agrupadas en el rango entre S/. 150,000.00 – S/ 1'500,000.00 presentaron el mayor promedio en sobretiempo (100%), seguidas de las obras con montos referenciales entre S/ 3MM – 6MM, con un 65% en promedio de exceso en su entrega.
- 6.4. Por otro lado, el porcentaje promedio de sobrecostos de las obras analizadas fluctúa entre (3% al 5%), siendo las obras del rango de menor presupuesto (S/. 150,000.00 - S/.1.5MM) las que sufren un mayor porcentaje de sobrecosto.
- 6.5. Por lo tanto, concluimos que las obras de menor rango, son las que se ven afectadas en mayor medida en sobretiempo, que en sobrecosto.

VII. RECOMENDACIONES

- 7.1. Esta investigación pretende advertir a los responsables de los proyectos prestar atención a las características de sus mallas de programación y realiza un análisis estocástico apoyado en la simulación de Montecarlo podrá estimar adecuadamente la duración.
- 7.2. Los métodos con simulación, tal como el método de Montecarlo son los métodos más eficaces para detectar el efecto de convergencia y detectar posibles riesgos que puedan impactar negativamente la obra.
- 7.3. En ese sentido, esta problemática debe ser incluida en los manuales y libros de programación de proyectos y más aún debe de ser impartida en las lecciones a los futuros ingenieros en las aulas universitarias a nivel nacional.
- 7.4. Esto trae como consecuencia que Gerentes de proyectos no familiarizados con esta metodología y que confían en los métodos tradicionales siguen dimensionado el éxito de los proyectos. Una de las razones por la resultaría un poco confuso el análisis del efecto de convergencia, es debido a la supuesta “complejidad” del mismo.

VIII. REFERENCIAS

- Adam, A. y Goran, L. (2017). Aggregation of factors causing cost overruns and time delays in large public construction projects: Trends and implications. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24(3). <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2015-0135>.
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2019). Reflexiones sobre costos. https://books.google.com.pe/books/about/Reflexiones_sobre_costos.html?id=XWK-DwAAQBAJ&redir_esc=y
- Contraloría General de la República (CGR). (Marzo del 2025). *Informe de obras públicas paralizadas en el territorio nacional a marzo*. <https://www.gob.pe/institucion/contraloria/informes-publicaciones/6792710-informe-de-obras-paralizadas-en-el-territorio-nacional-a-marzo-2025>
- D'onofrio, R. (2012). CPM Scheduling: A 60-year History Trends. *Construction Engineering Management*, 143(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001381](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001381)
- Flyvbjerg, B. (2017). *The Oxford Handbook of Megaproject Management. The Iron Law of megaproject Management*. Oxford University. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198732242.013.1>
- Hernandez-Sampieri, R., Fernandez, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6 ed). McGraw Hill Education.
- Huang, J. y Wang, X. (2009). *Risk Analysis of construction Schedule Based on PERT and MC Simulation*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi:10.1109/ICIII.2009.195>
- Hullet, D. (2008). *Practical Schedule Risk Analysis* (1^{era} ed.). Routledge.

INFObras (2025). Sistema de información de obras públicas.

<https://infobras.contraloria.gob.pe/infobrasweb>

Lenfle, B. y Loch, C. (2017). *The Oxford Handbook of Megaproject Management. Has Megaproject Management Lost its ways?: Lessons from History*. Oxford University.

<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198732242.013.2>

Monteverde, H. y Pereyra, A. (2019). *Reflexiones sobre costos*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

https://books.google.com.pe/books/about/Reflexiones_sobre_costos.html?id=XWK-DwAAQBAJ&redir_esc=y

O'Brien, J. (1996). *CPM in Construction Management*. (3 ed). McGraw Hill Construction Engineering Series.

Oliveira, J. (2021). *El desarrollo de los misiles Polaris y la técnica PERT* [Fotografía]. Va de Barcos. (<https://vadebarcos.net/2021/02/27/el-desarrollo-de-los-misiles-polaris-y-la-tecnica-pert/>)

Organización de las Naciones Unidas (2017). *Objetivos de Desarrollo sostenible*.

<https://www.un.org/es/common-agenda/sustainable-development-goals>

Sasieni, M. (1986). A note on PERT times. *The institute of Management Sciences*, 32 (12), 1652-1653. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.12.1652>

Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado [SEACE] (2025). *Sistema electrónico de contrataciones del estado*. <https://prod2.seace.gob.pe/seacebus-uiwd-pub/buscadorPublico/buscadorPublico.xhtml>

Sistema de Seguimiento de Inversiones [SSI] (2025). *Sistema de seguimiento de inversiones*. <https://ofi5.mef.gob.pe/ssi/>

- Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (4ª ed.). Editorial Limusa.
- Valadares, L., Antunes, J., y Silva, J. (1999). The Risk of Delay of a project in terms of the morphology of its network. *European Journal of Operational Research*, 119 (1999) 510-537. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00150-2)
- Vancoucke, M. (2013). *Project Management with Dynamic schedule: Baseline Scheduling, Risk Analysis and Project Control*. (2nd Ed.). Springer.

IX. ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia

ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA														
Problema general ¿En qué medida, la presencia del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas impacta en los proyectos de Obras de Construcción públicas?	Objetivo general Evaluar y cuantificar el impacto del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la Programación de Proyectos de construcción de obras públicas.	Variable 1. Efecto de convergencia de rutas paralelas <table><tr><th>Dimensiones</th><th>Indicadores</th></tr><tr><td rowspan="3">V1. Características intrínsecas de la programación de la obra</td><td>Índice SP</td></tr><tr><td>Análisis de Montecarlo</td></tr><tr><td>Nº de rutas de actividades paralelas</td></tr></table> Variable 2. Impacto en tiempo y costos de los proyectos de construcción de obras públicas <table><tr><th>Dimensiones</th><th>Indicadores</th></tr><tr><td rowspan="3">V1. De tiempo</td><td>Cronograma PERT-CPM</td></tr><tr><td>Distribución de las actividades que conforman la malla de la obra</td></tr><tr><td>Fecha de finalización contractual</td></tr><tr><td></td><td>Fecha de finalización real</td></tr></table>	Dimensiones	Indicadores	V1. Características intrínsecas de la programación de la obra	Índice SP	Análisis de Montecarlo	Nº de rutas de actividades paralelas	Dimensiones	Indicadores	V1. De tiempo	Cronograma PERT-CPM	Distribución de las actividades que conforman la malla de la obra	Fecha de finalización contractual		Fecha de finalización real	Nivel de la investigación Descriptivo – Correlacional Método Mixto - Cualitativo Diseño de la Investigación No experimental Población: La población objeto del estudio está determinado por los proyectos de administración Indirecta ejecutados en todo el territorio nacional entre los años 2021 al 2024. Muestra La muestra del estudio fue de 150 proyectos de construcción de obras públicas
Dimensiones	Indicadores																
V1. Características intrínsecas de la programación de la obra	Índice SP																
	Análisis de Montecarlo																
	Nº de rutas de actividades paralelas																
Dimensiones	Indicadores																
V1. De tiempo	Cronograma PERT-CPM																
	Distribución de las actividades que conforman la malla de la obra																
	Fecha de finalización contractual																
	Fecha de finalización real																

Problema específico 1 ¿En qué medida la presencia del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas impacta en la duración de los proyectos de Obras de Construcción públicas?	Objetivo específico 1 Evaluar y determinar el impacto en unidades de tiempo, del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la Programación de Proyectos de construcción de obras públicas.	<table><tr><td rowspan="3">V2. De Costos</td><td>Costo contratado entre el contratista y la entidad</td></tr><tr><td>Costo final contractual</td></tr><tr><td>Costo final real</td></tr></table>	V2. De Costos	Costo contratado entre el contratista y la entidad	Costo final contractual	Costo final real	
V2. De Costos	Costo contratado entre el contratista y la entidad						
	Costo final contractual						
	Costo final real						
Problema específico 2 ¿En qué medida la presencia del efecto de convergencia de rutas paralelas impacta en el costo de los proyectos de Obras de Construcción públicas?	Objetivo específico 2 Evaluar y determinar el impacto en unidades monetarias, del efecto de convergencia de múltiples rutas paralelas en la Programación de Proyectos de construcción de obras públicas.						

Anexo B. Base de datos con los proyectos de la muestra

Nº	Código único de inversión (CUI)	Costo Inicial (\$.)	SP (Indicador Serie Paralelo)	Sobretiempo (días)	Costo Final (\$.)	Situación final del proyecto (Tiempo)	Situación final del proyecto (Costo)
1	2503557	S/455,652.26	70%	0	S/455,652.26	Fixed-Time	Fixed-Cost
2	2486956	S/91,313.03	38%	0	S/91,313.03	Fixed-Time	Fixed-Cost
3	2577744	S/481,334.43	53%	0	S/481,334.43	Fixed-Time	Fixed-Cost
4	2540629	S/211,147.89	40%	0	S/211,147.89	Fixed-Time	Fixed-Cost
5	2460208	S/109,260.73	68%	0	S/109,260.73	Fixed-Time	Fixed-Cost
6	2536121	S/131,874.07	100%	0	S/131,874.07	Fixed-Time	Fixed-Cost
7	2554979	S/521,219.44	37%	0	S/521,219.44	Fixed-Time	Fixed-Cost
8	2558296	S/452,072.96	38%	0	S/452,072.96	Fixed-Time	Fixed-Cost
9	2533824	S/196,748.74	32%	0	S/196,748.74	Fixed-Time	Fixed-Cost
10	2210173	S/1,601,895.15	30%	0	S/1,601,895.15	Fixed-Time	Fixed-Cost
11	2527513	S/732,705.13	65%	0	S/732,705.13	Fixed-Time	Fixed-Cost
12	2457774	S/397,552.76	43%	0	S/397,552.76	Fixed-Time	Fixed-Cost
13	2480240	S/1,007,092.29	42%	0	S/1,007,092.29	Fixed-Time	Fixed-Cost
14	2491066	S/366,052.43	41%	0	S/366,052.43	Fixed-Time	Fixed-Cost
15	2043120	S/443,844.47	64%	0	S/443,844.47	Fixed-Time	Fixed-Cost
16	2236035	S/310,142.19	45%	0	S/310,142.19	Fixed-Time	Fixed-Cost
17	2245962	S/1,200,705.74	41%	0	S/1,200,705.74	Fixed-Time	Fixed-Cost
18	2500691	S/278,778.80	71%	0	S/278,778.80	Fixed-Time	Fixed-Cost
19	2527041	S/173,515.70	51%	0	S/173,515.70	Fixed-Time	Fixed-Cost
20	2502496	S/396,605.79	31%	0	S/396,605.79	Fixed-Time	Fixed-Cost
21	2591353	S/336,519.19	33%	0	S/336,519.19	Fixed-Time	Fixed-Cost
22	2578242	S/469,671.41	54%	0	S/469,671.41	Fixed-Time	Fixed-Cost
23	2531293	S/823,677.58	56%	0	S/823,677.58	Fixed-Time	Fixed-Cost
24	2540340	S/524,073.21	32%	0	S/524,073.21	Fixed-Time	Fixed-Cost
25	2457152	S/452,379.71	40%	0	S/452,379.71	Fixed-Time	Fixed-Cost
26	2517627	S/1,151,916.80	33%	0	S/1,151,916.80	Fixed-Time	Fixed-Cost
27	2503796	S/350,433.34	30%	0	S/350,433.34	Fixed-Time	Fixed-Cost
28	2506547	S/327,210.97	35%	0	S/327,210.97	Fixed-Time	Fixed-Cost
29	2531525	S/290,285.63	42%	0	S/290,285.63	Fixed-Time	Fixed-Cost
30	2552425	S/1,921,319.08	86%	0	S/1,921,319.08	Fixed-Time	Fixed-Cost
31	2554440	S/234,995.05	82%	0	S/234,995.05	Fixed-Time	Fixed-Cost
32	2553162	S/1,836,688.96	49%	0	S/1,836,688.96	Fixed-Time	Fixed-Cost
33	2496255	S/141,246.35	44%	0	S/141,246.35	Fixed-Time	Fixed-Cost
34	2536245	S/346,717.26	44%	0	S/346,717.26	Fixed-Time	Fixed-Cost
35	2536244	S/422,922.15	47%	0	S/422,922.15	Fixed-Time	Fixed-Cost
36	2564299	S/595,410.60	38%	0	S/595,410.60	Fixed-Time	Fixed-Cost
37	2533147	S/384,581.00	89%	0	S/384,581.00	Fixed-Time	Fixed-Cost
38	2564335	S/183,199.70	32%	0	S/183,199.70	Fixed-Time	Fixed-Cost
39	2558930	S/192,568.48	50%	0	S/192,568.48	Fixed-Time	Fixed-Cost
40	2560662	S/2,228,899.85	38%	0	S/2,228,899.85	Fixed-Time	Fixed-Cost
41	2551159	S/148,917.25	60%	0	S/148,917.25	Fixed-Time	Fixed-Cost
42	2568576	S/372,927.31	33%	0	S/372,927.31	Fixed-Time	Fixed-Cost
43	2314575	S/368,940.02	44%	0	S/368,940.02	Fixed-Time	Fixed-Cost
44	2529561	S/261,148.01	43%	0	S/261,148.01	Fixed-Time	Fixed-Cost
45	2591337	S/599,894.54	49%	0	S/599,894.54	Fixed-Time	Fixed-Cost
46	2455346	S/2,132,765.44	37%	0	S/2,132,765.44	Fixed-Time	Fixed-Cost
47	2499496	S/225,057.82	33%	0	S/225,057.82	Fixed-Time	Fixed-Cost
48	2517891	S/2,823,768.93	40%	0	S/2,823,768.93	Fixed-Time	Fixed-Cost
49	2253250	S/194,096.21	35%	0	S/194,096.21	Fixed-Time	Fixed-Cost
50	2576659	S/300,502.48	33%	0	S/300,502.48	Fixed-Time	Fixed-Cost
51	2529959	S/234,727.62	43%	0	S/234,727.62	Fixed-Time	Fixed-Cost
52	2550323	S/196,260.95	100%	-4	S/196,260.95	Undertime	Fixed-Cost
53	2545583	S/274,952.15	36%	-4	S/274,952.15	Undertime	Fixed-Cost
54	2546911	S/478,050.05	31%	-4	S/478,050.05	Undertime	Fixed-Cost
55	2522165	S/1,593,283.43	40%	-3	S/1,593,283.43	Undertime	Fixed-Cost
56	2495004	S/1,051,187.43	38%	-1	S/1,051,187.43	Undertime	Fixed-Cost
57	2461664	S/474,314.00	43%	0	S/474,314.00	Undertime	Fixed-Cost
58	2528878	S/927,968.76	56%	-6	S/927,968.76	Undertime	Fixed-Cost
59	2539131	S/215,255.69	55%	-6	S/215,255.69	Undertime	Fixed-Cost
60	2593503	S/557,100.01	30%	119	S/596,011.52	Overtime	Overcost
61	2320360	S/554,600.44	15%	314	S/613,865.63	Overtime	Overcost
62	2450246	S/835,650.00	20%	30	S/835,650.00	Overtime	Fixed-Cost
63	2478623	S/388,949.13	22%	125	S/435,061.07	Overtime	Overcost
64	2465687	S/450,395.11	26%	62	S/504,247.21	Overtime	Overcost
65	2497087	S/250,292.23	29%	15	S/250,292.23	Overtime	Fixed-Cost
66	2492929	S/316,178.84	21%	67	S/346,158.05	Overtime	Overcost
67	2483990	S/581,076.16	25%	46	S/607,056.43	Overtime	Overcost
68	2465841	S/233,475.86	25%	1	S/233,475.86	Fixed-Time	Fixed-Cost
69	2604709	S/239,980.52	26%	10	S/269,963.94	Overtime	Overcost
70	2561469	S/209,473.48	13%	1	S/234,672.17	Fixed-Time	Overcost
71	2546687	S/243,542.11	20%	85	S/267,984.17	Overtime	Overcost
72	2510381	S/4,941,330.94	20%	37	S/4,941,330.94	Overtime	Fixed-Cost

73	2522574	S/1,972,557.44	24%	1	S/2,046,510.11	Fixed-Time	Overcost
74	2546338	S/582,045.49	12%	12	S/613,341.13	Overtime	Overcost
75	2153988	S/5,328,100.52	21%	21	S/5,619,754.63	Overtime	Overcost
76	2521688	S/1,386,479.20	12%	62	S/1,439,354.98	Overtime	Overcost
77	2287808	S/969,766.62	11%	79	S/1,094,994.45	Overtime	Overcost
78	2557632	S/4,615,071.34	9%	17	S/4,615,071.34	Overtime	Fixed-Cost
79	2477963	S/2,449,990.54	25%	193	S/2,063,439.29	Overtime	Undercost
80	2553408	S/418,045.10	20%	217	S/458,045.07	Overtime	Overcost
81	2552495	S/1,361,442.89	16%	132	S/1,436,583.42	Overtime	Overcost
82	2557474	S/2,484,236.16	23%	62	S/2,484,236.16	Overtime	Fixed-Cost
83	2496568	S/2,649,522.13	14%	106	S/2,755,046.04	Overtime	Overcost
84	2527632	S/725,400.36	28%	22	S/744,881.76	Overtime	Overcost
85	2527617	S/410,059.80	25%	44	S/441,445.40	Overtime	Overcost
86	2457945	S/1,273,054.91	16%	102	S/1,451,619.20	Overtime	Overcost
87	2528871	S/881,449.18	29%	322	S/857,363.20	Overtime	Undercost
88	2408914	S/380,112.01	21%	21	S/424,888.88	Overtime	Undercost
89	2228027	S/1,532,088.38	21%	100	S/1,732,023.97	Overtime	Overcost
90	2373516	S/3,058,516.71	7%	37	S/3,078,703.80	Overtime	Overcost
91	2447521	S/267,669.05	14%	2	S/268,358.31	Overtime	Overcost
92	2447207	S/1,230,738.82	18%	35	S/1,286,192.88	Overtime	Overcost
93	2468742	S/936,872.56	13%	78	S/915,043.26	Overtime	Undercost
94	2181809	S/1,970,958.18	29%	10	S/1,982,878.75	Overtime	Overcost
95	2340451	S/877,624.00	25%	107	S/834,558.75	Overtime	Undercost
96	2516586	S/378,982.19	27%	6	S/378,982.19	Overtime	Fixed-Cost
97	2476088	S/1,229,915.01	10%	101	S/1,224,911.69	Overtime	Undercost
98	2509350	S/603,232.00	5%	101	S/603,232.00	Overtime	Fixed-Cost
99	2460948	S/3,239,378.30	18%	17	S/3,555,501.74	Overtime	Overcost
100	2343059	S/368,803.99	10%	82	S/401,565.47	Overtime	Overcost
101	2542191	S/1,619,205.61	12%	44	S/1,619,205.61	Overtime	Fixed-Cost
102	2222781	S/3,959,988.73	21%	296	S/4,341,423.93	Overtime	Overcost
103	2522338	S/1,016,275.64	26%	43	S/1,016,275.64	Overtime	Fixed-Cost
104	2507661	S/438,785.24	21%	13	S/438,785.24	Overtime	Fixed-Cost
105	2505892	S/871,565.44	15%	11	S/891,798.69	Overtime	Overcost
106	2537833	S/1,857,947.09	25%	16	S/1,857,947.09	Overtime	Fixed-Cost
107	2530427	S/667,499.04	20%	188	S/723,513.49	Overtime	Overcost
108	2499548	S/378,433.74	13%	142	S/413,671.75	Overtime	Overcost
109	2141132	S/1,542,904.26	7%	315	S/1,576,944.01	Overtime	Overcost
110	2553832	S/1,117,667.17	25%	202	S/1,127,933.60	Overtime	Overcost
111	2517007	S/535,662.97	12%	32	S/564,710.85	Overtime	Overcost
112	2471499	S/744,554.42	19%	12	S/837,974.05	Overtime	Overcost
113	2444005	S/2,517,051.98	25%	33	S/2,627,394.43	Overtime	Overcost
114	2381037	S/1,636,883.42	22%	33	S/1,761,719.40	Overtime	Overcost
115	2494494	S/916,858.79	26%	44	S/937,641.51	Overtime	Overcost
116	2245876	S/773,419.47	24%	55	S/773,419.47	Overtime	Fixed-Cost
117	2560908	S/1,784,227.34	16%	12	S/1,784,227.34	Overtime	Fixed-Cost
118	2519710	S/246,332.19	12%	132	S/263,188.99	Overtime	Overcost
119	2483507	S/1,780,353.41	26%	197	S/1,998,589.09	Overtime	Overcost
120	2518141	S/379,733.27	24%	82	S/379,733.27	Overtime	Fixed-Cost
121	2528733	S/436,872.43	16%	19	S/480,538.96	Overtime	Overcost
122	2505906	S/879,497.96	23%	101	S/910,438.38	Overtime	Overcost
123	2532410	S/455,389.44	13%	16	S/510,041.17	Overtime	Overcost
124	2525381	S/1,669,708.43	12%	62	S/1,669,708.43	Overtime	Fixed-Cost
125	2480801	S/1,342,045.06	29%	230	S/1,342,045.06	Overtime	Fixed-Cost
126	2546580	S/1,045,906.28	19%	27	S/1,193,488.49	Overtime	Overcost
127	2396727	S/1,179,622.13	9%	57	S/1,179,622.13	Overtime	Fixed-Cost
128	2517509	S/1,622,940.68	7%	163	S/1,780,734.53	Overtime	Overcost
129	2319071	S/1,742,542.67	8%	47	S/1,801,276.00	Overtime	Overcost
130	2473671	S/149,828.13	29%	36	S/149,828.13	Overtime	Fixed-Cost
131	2558737	S/282,272.50	11%	34	S/275,697.83	Overtime	Undercost
132	2556444	S/1,955,348.32	22%	45	S/2,048,217.07	Overtime	Overcost
133	2541803	S/433,869.01	16%	239	S/443,799.15	Overtime	Overcost
134	2335747	S/267,709.16	20%	42	S/267,709.16	Overtime	Fixed-Cost
135	2552643	S/2,784,639.15	22%	68	S/2,931,348.38	Overtime	Overcost
136	2474487	S/4,008,254.18	16%	173	S/4,163,148.93	Overtime	Overcost
137	2550258	S/4,618,110.07	29%	4	S/4,618,110.07	Overtime	Fixed-Cost
138	2547805	S/1,697,011.43	20%	6	S/1,696,674.77	Overtime	Undercost
139	2539198	S/1,325,535.54	21%	86	S/1,465,505.61	Overtime	Overcost
140	2513146	S/1,837,794.78	13%	15	S/1,839,711.57	Overtime	Overcost
141	2306561	S/1,191,345.09	9%	30	S/1,191,345.09	Overtime	Fixed-Cost
142	2556786	S/1,992,288.80	22%	1	S/2,228,428.49	Fixed-Time	Overcost
143	2524561	S/661,060.15	28%	130	S/693,431.44	Overtime	Overcost
144	2470505	S/2,163,118.59	12%	69	S/2,309,200.59	Overtime	Overcost
145	2542273	S/396,125.26	20%	61	S/396,125.26	Overtime	Fixed-Cost
146	2524155	S/984,602.74	22%	27	S/984,602.74	Overtime	Fixed-Cost
147	2524282	S/316,324.72	25%	72	S/316,324.72	Overtime	Fixed-Cost
148	2545476	S/5,422,556.54	9%	64	S/5,422,556.54	Overtime	Fixed-Cost
149	2524404	S/952,807.26	12%	123	S/1,081,096.36	Overtime	Overcost
150	2507175	S/600,727.49	17%	1	S/767,778.72	Fixed-Time	Overcost

Anexo C. Instrumento de recolección de datos

 2593503	Case Name: Urban Road Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline Schedule	Schedule with resources
			Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation
Processed by	Amin Azimi		One of nine std. scenarios
Date	2025		User defined distributions
File Name	C2025-03	Project Control	Automatic tracking
			Tracking based on user input

1. Project description

Project authenticity

The construction of road pavement, sidewalks (veredas), and culverts to improve urban mobility and stormwater management.

The project consists of activity and cost data that were obtained directly from the actual project owner

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	100	Serial/Parallel (SP)	30%
Planned Duration (PD)	52 days	Activity Distribution (AD)	41%
Budget At Completion (BAC)	197,472.31€	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	6 Types	Topological Float (TF)	40%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

Cost sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	10.13	8.98	0.83
CRI-rho	16.83	15.25	1.17
CRI-tau	20.86	31.20	2.11

Resource sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	16.78	7.01	6.73
CRI-rho	16.78	7.01	6.73
CRI-tau	16.78	7.01	6.73

Time sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CI	30.73	45.18	0.83
SI	32.33	37.68	1.10
SSI	5.08	9.23	3.09
CRI-r	11.22	9.66	3.04
CRI-rho	10.92	9.77	3.01
CRI-tau	11.22	8.35	1.30

 OR-AS Operations Research Applications and Solutions 2461664	Case Name: Convertible Roofing Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline Schedule Schedule with resources Schedule with costs	
Processed by	Amin Azimi	Risk Analysis Random simulation One of nine std. scenarios User defined distributions	
Date	2025	Project Control Automatic tracking	
File Name	C2025-10	Tracking based on user input	

1. Project description

Project authenticity

Construction of permanent convertible roofs to enhance infrastructure flexibility in educational or public spaces. The project includes site preparation, preliminary works, and full construction of adaptable roofing systems. The project consists of activity and cost data that were obtained directly from the actual project owner.

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	75	Serial/Parallel (SP)	43%
Planned Duration (PD)	60 days	Activity Distribution (AD)	41%
Budget At Completion (BAC)	349,558.26€	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	6 Types	Topological Float (TF)	38%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

Cost sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	11.33	9.06	0.70
CRI-rho	11.49	8.74	0.76
CRI-tau	9.00	5.44	0.70

Resource sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	33.55	3.30	5.14
CRI-rho	33.55	3.30	5.14
CRI-tau	33.55	3.30	5.14

Time sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CI	42.83	47.41	0.30
SI	52.27	42.65	0.05
SSI	6.88	10.78	2.16
CRI-r	10.99	9.39	1.89
CRI-rho	10.91	9.44	1.80
CRI-tau	9.79	7.18	0.83

 OR-AS Operations Research Applications and Solutions 2478623	Case Name : ACTIVIDADES GENERALES Project owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline	Schedule with resources
		Schedule	Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation One of nine std. scenarios User defined distributions
Processed by	Zahra Hussaini	Project Control	Automatic tracking
Date	2025		Tracking based on user input
File Name	Pero Project 21		

1. Project description

Project authenticity

This project involves the construction and repair of multiple bridges—including Puente Conin, Puente Chacpar, and Puente Lanchan—through activities such as excavation, concrete work, gabion installation, and environmental mitigation, ensuring safe and sustainable infrastructure development. The project consists of activity, resource and cost data that were obtained directly from the actual project owner

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	49	Serial/Parallel (SP)	22%
Planned Duration (PD)	56 days	Activity Distribution (AD)	25%
Budget At Completion (BAC)	298774.875 EUR	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	6 Types	Topological Float (TF)	39%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

Cost sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	13.7	12.3	166.7
CRI-rho	13.6	12.1	172.9
CRI-tau	9.4	8.6	146.5

Resource sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	26.0	8.6	360.2
CRI-rho	26.0	8.6	360.2
CRI-tau	26.0	8.6	360.2

Time sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CI	24.5	42.5	122.3
SI	36.3	38.5	93.0
SSI	6.4	13.4	225.8
CRI-r	11.9	12.0	170.4
CRI-rho	11.6	12.1	164.9
CRI-tau	9.9	8.1	97.3

 2486956	Case Name: TEMPORARY WORKS Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline Schedule	Schedule with resources
			Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation
			One of nine std. scenarios
Processed by	Zahra Hussaini		User defined distributions
Date	2025	Project Control	Automatic tracking
File Name	C2025-27		Tracking based on user input

1. Project description

Project authenticity

This project describes the different activities and their interrelations in the construction and improvement of a sanitary sewer system, including excavation, pipe installation, manhole construction, backfilling, safety measures, and final restoration works, aimed at enhancing public sanitation services and ensuring safe wastewater management in the area. The project consists of activity and cost data that were obtained directly from the actual project owner.

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	45	Serial/Parallel (SP)	38%
Planned Duration (PD)	27 days	Activity Distribution (AD)	29%
Budget At Completion (BAC)	73441.85 €	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	7 Types	Topological Float (TF)	31%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

	Cost sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	0.0	0.1	6.7
CRI-rho	0.7	0.0	6.7
CRI-tau	1.0	0.1	-6.7

	Time sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CI	0.4	0.5	0.4
SI	0.5	0.4	0.2
SSI	0.1	0.1	0.9
CRI-r	0.1	0.1	1.1
CRI-rho	0.1	0.1	1.2
CRI-tau	0.1	0.1	0.4

	Resource sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	0	0	N/A
CRI-rho	0	0	N/A
CRI-tau	0	0	N/A

 OR-AS Operations Research Applications and Solutions 2465687	Case Name: TEMPORARY WORKS Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline	Schedule with resources
		Schedule	Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation One of nine std. scenarios User defined distributions
Processed by	Zahra Hussaini	Project Control	Automatic tracking Tracking based on user input
Date	2025		
File Name	C2025-22		

1. Project description

Project authenticity

This project describes the different activities and their interrelations in the improvement and rehabilitation of infrastructure, sanitary systems, electrical installations, and environmental protection works at and around a thermal bath facility, including support for health and hygiene services, safety measures, and COVID-19 prevention, aiming to enhance user experience, accessibility, and safety conditions in the area. The project consists of activity and cost data that were obtained directly from the actual project owner.

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	170	Serial/Parallel (SP)	26%
Planned Duration (PD)	90 days	Activity Distribution (AD)	47%
Budget At Completion (BAC)	338686.53 €	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	8 Types	Topological Float (TF)	29%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

	Cost sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	0.6	7.7	13.0
CRI-rho	51.5	3.7	13.0
CRI-tau	99.8	2.0	-13.0

	Resource sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	0	0	N/A
CRI-rho	0	0	N/A
CRI-tau	0	0	N/A

	Time sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CI	7.7	11.7	1.2
SI	16.7	15.1	1.2
SSI	1.1	7.4	9.8
CRI-r	8.2	7.4	3.4
CRI-rho	8.1	7.4	3.1
CRI-tau	9.2	7.3	1.8

 2503557	Case Name: DRAIN ROUTE R04 Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline Schedule	Schedule with resources
			Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation
Processed by	Zahra Hussaini		One of nine std. scenarios
Date	2025		User defined distributions
File Name	C2025-24	Project Control	Automatic tracking
			Tracking based on user input

1. Project description

Project authenticity

This project describes the different activities and their relations in the construction and improvement of the **Alcantarilla Ruta R04** (culvert along the Playa Hermosa - Shama route), including earthworks, concrete structures, drainage systems, and COVID-19 safety measures to ensure proper infrastructure functionality and worker protection. The project consists of activity, resource and cost data that were obtained directly from the actual project owner.

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	38	Serial/Parallel (SP)	70%
Planned Duration (PD)	59 days	Activity Distribution (AD)	65%
Budget At Completion (BAC)	392053.5313 EUR	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	7 Types	Topological Float (TF)	52%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

Cost sensitivity				Time sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]		avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	12.2	14.0	3.3	CI	37.6	27.4	0.1
CRI-rho	Resource sensitivity			SI	49.7	28.2	-0.5
CRI-tau				SSI	4.4	4.9	1.2
CRI-r	13.7	12.4	4.3	CRI-r	11.4	13.7	4.2
CRI-rho	13.7	12.4	4.3	CRI-rho	11.6	13.2	3.9
CRI-tau	13.7	12.4	4.3	CRI-tau	9.1	10.6	4.2

 2503557	Case Name: DRAIN ROUTE R04 Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline Schedule	Schedule with resources
			Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation
Processed by	Zahra Hussaini		One of nine std. scenarios
Date	2025		User defined distributions
File Name	C2025-24	Project Control	Automatic tracking
			Tracking based on user input

1. Project description

Project authenticity

This project describes the different activities and their relations in the construction and improvement of the **Alcantarilla Ruta R04** (culvert along the Playa Hermosa - Shama route), including earthworks, concrete structures, drainage systems, and COVID-19 safety measures to ensure proper infrastructure functionality and worker protection. The project consists of activity, resource and cost data that were obtained directly from the actual project owner.

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	38	Serial/Parallel (SP)	70%
Planned Duration (PD)	59 days	Activity Distribution (AD)	65%
Budget At Completion (BAC)	392053.5313 EUR	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	7 Types	Topological Float (TF)	52%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

Cost sensitivity				Time sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]		avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	12.2	14.0	3.3	CI	37.6	27.4	0.1
CRI-rho	Resource sensitivity			SI	49.7	28.2	-0.5
CRI-lau	avg [%]	std dev [%]	skew [-]	SSI	4.4	4.9	1.2
CRI-r	13.7	12.4	4.3	CRI-r	11.4	13.7	4.2
CRI-rho	13.7	12.4	4.3	CRI-rho	11.6	13.2	3.9
CRI-lau	13.7	12.4	4.3	CRI-lau	9.1	10.6	4.2

 2497087	Case Name: CONSTRUCTION OF PERIMETER FENCE Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline Schedule	Schedule with resources
			Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation
Processed by	Zahra Hussaini		One of nine std. scenarios
Date	2025		User defined distributions
File Name	C2025-26	Project Control	Automatic tracking
			Tracking based on user input

1. Project description

Project authenticity

This project describes the different activities and their relations in the construction and improvement of perimeter fencing, roofing, and sanitary facilities (including restrooms/changing rooms) for the Citizen Security Service in Independencia District, incorporating structural works, electrical/sanitary installations, and COVID-19 safety protocols to enhance operational infrastructure and personnel welfare. The project consists of activity and cost data that were obtained directly from the actual project owner.

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	140	Serial/Parallel (SP)	29%
Planned Duration (PD)	44 days	Activity Distribution (AD)	33%
Budget At Completion (BAC)	161,654.99 €	Length of Arcs (LA)	0%
Renewable Resources	7 Types	Topological Float (TF)	54%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

	Cost sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	10.0	7.7	1.4
CRI-rho	10.2	7.6	1.2
CRI-tau	9.3	6.6	0.7

	Resource sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	7.1	7.4	6.0
CRI-rho	7.1	7.4	6.0
CRI-tau	7.1	7.4	6.0

	Time sensitivity		
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CI	17.1	22.5	1.6
SI	32.2	25.8	0.8
SSI	3.2	8.3	5.2
CRI-r	9.2	8.5	3.0
CRI-rho	8.9	8.2	3.2
CRI-tau	11.7	7.5	0.8

 OR-AS Operations Research Applications and Solutions 2320360	Case Name: Power Network Project Owner: Eder Omar Vilca Carrillo	Sector	Construction
	OR-AS Operations Research - Applications and Solutions www.or-as.be info@or-as.be	Baseline Schedule	Schedule with resources
			Schedule with costs
		Risk Analysis	Random simulation
Processed by	Amin Azimi		One of nine std. scenarios
Date	2025		User defined distributions
File Name	C2025-14	Project Control	Automatic tracking
			Tracking based on user input

1. Project description

Project authenticity

Expansion of 440/220 V secondary electricity distribution networks to provide new household connections. The project includes equipment mobilization, structure layout, pole installation, and connection to end-users. The project consists of activity and cost data that were obtained directly from the actual project owner.

2. Project properties

2.1. Baseline Schedule

General		Network topology	
# Activities	33	Serial/Parallel (SP)	15%
Planned Duration (PD)	119 days	Activity Distribution (AD)	71%
Budget At Completion (BAC)	22,226.08€	Length of Arcs (LA)	2%
Renewable Resources	6 Types	Topological Float (TF)	30%
Consumable Resources	0 Types		

* standard eight-hour working days

2.2. Risk Analysis

Random simulation by ProTrack was performed using the default symmetric triangular risk distribution profiles.

Cost sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	15.77	12.06	1.07
CRI-rho	15.82	12.26	1.16
CRI-tau	10.22	8.10	1.33

Resource sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CRI-r	28.52	8.28	3.64
CRI-rho	28.52	8.28	3.64
CRI-tau	28.52	8.28	3.64

Time sensitivity			
	avg [%]	std dev [%]	skew [-]
CI	18.06	33.01	1.74
SI	41.34	28.05	1.02
SSI	7.54	13.60	1.81
CRI-r	14.20	13.70	1.68
CRI-rho	14.26	13.48	1.60
CRI-tau	9.69	8.83	1.57