

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DEL FACTOR DE
ADHERENCIA Y LAS ACTIVIDADES DE LA RUTA CRÍTICA
EN LAS ESTIMACIONES A TÉRMINO DE LOS PROYECTOS**

Ing. Andrés Mauricio Herrera Aguirre

Ing. Carlos Eduardo Rueda Fernández

Arq. Vladimir Ilich Velásquez Hernández

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
UNIDAD DE PROYECTOS
MAESTRÍA EN DESARROLLO Y GERENCIA INTEGRAL DE
PROYECTOS
BOGOTÁ D.C.
2018**

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DEL FACTOR DE
ADHERENCIA Y LAS ACTIVIDADES DE LA RUTA CRÍTICA
EN LAS ESTIMACIONES A TÉRMINO DE LOS PROYECTOS**

Ing. Andrés Mauricio Herrera Aguirre
Ing. Carlos Eduardo Rueda Fernández
Arq. Vladimir Ilich Velásquez Hernández

TRABAJO DE GRADO

Director de Trabajo de grado
Ing. Rodrigo Buzeta

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
UNIDAD DE PROYECTOS
MAESTRÍA EN DESARROLLO Y GERENCIA INTEGRAL DE
PROYECTOS
BOGOTÁ D.C.
2018**

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	7
2.	Propósito y alineación estratégica	7
2.1	Propósito.....	7
2.2	Objetivos estratégicos de las organizaciones.....	7
3.	Justificación	8
4.	Antecedentes.....	8
5.	Objetivos.....	11
5.1	Objetivo general	11
5.2	Objetivos específicos.....	11
6.	Marco teórico.....	12
6.1	Gestión de Valor Ganado – <i>Earned Value Management</i> (EVM).	12
6.2	Medición del Desempeño	14
6.2.1	Variaciones	14
6.2.2	Porcentajes de Variación	16
6.2.3	Índices de Desempeño	17
6.2.4	Pronósticos	18
6.2.5	Variación al terminar o <i>Variance At Completion</i> (VAC):.....	21
6.3	Deficiencia en los indicadores de tiempo de la metodología de Gestión de Valor Ganado (EVM).....	21
6.4	Programación Ganada o <i>Earned Schedule</i> (ES).....	23
6.5	Método de la Ruta Crítica o <i>Critical Path Method</i> (CPM)	27
6.6	Adherencia al Cronograma.....	29
6.6.1	Factor de Adherencia o Factor P	30
6.7	Programación Ganada en la Ruta Crítica	33

6.8	Adherencia al cronograma y el retrabajo.....	34
7.	Hipótesis (Hi)	34
7.1	Hipótesis #1 – Hi ₁	35
7.1.1	Justificación	35
7.1.2	Factor de Desempeño #1	35
7.1.3	Estimado al terminar en tiempo #1 (EAC _t #1):	36
7.2	Hipótesis #2 – Hi ₂	36
7.2.1	Justificación	36
7.2.2	Factor de Desempeño #2	37
7.2.3	Estimado al terminar en tiempo #2 (EAC _t #2):	37
7.3	Hipótesis #3 – Hi ₃	38
7.3.1	Justificación	38
7.3.2	Factor de Desempeño #3	38
7.3.3	Estimado al terminar en tiempo #3 (EAC _t #3):	38
8.	Metodología.....	38
8.1	Revisión de literatura.....	39
8.1.1	Justificación de la Revisión de Sistemática de Literatura	39
8.1.2	Formulación de las preguntas de la Revisión Sistemática de Literatura	39
8.1.3	Diseño del protocolo de búsqueda.....	40
8.1.3.1	Criterios de inclusión	40
8.1.3.2	Criterios de exclusión.....	40
8.1.3.3	Evaluación de calidad.....	40
8.1.4	Búsqueda de información	40
8.1.4.1	Palabras claves	41
8.1.4.2	Combinaciones	41

8.2	Validación de hipótesis.....	42
8.2.1	Selección de proyectos	43
8.2.2	Precisión de la evaluación del pronóstico.....	46
8.2.3	Pronóstico de estimación de la fecha de terminación y cálculo del MAPE ...	46
9.	Resultados.....	46
9.1	Hallazgos de la Revisión Sistemática de Literatura	46
9.2	Análisis de resultados	47
9.2.1	Hipótesis 1 (H_{i1}) – Factor de desempeño = SPI Crítico	48
9.2.2	Hipótesis 2 (H_{i2}) – Factor de desempeño = SPI x P.....	51
9.2.3	Hipótesis 3 (H_{i3}) – Factor de desempeño = Factor P	51
10.	Conclusiones y Recomendaciones	52
11.	Trabajo futuro	55
12.	Referencias	56
13.	Anexos.....	58
13.1	Proyectos seleccionados	58
13.2	Artículos encontrados en la RSL	59
13.3	Tabla de resultados general	62
13.4	Proyectos con Ruta Crítica Favorable	65

Listado de gráficas, figuras e imágenes

Figura 1: Metodología de Gestión de Valor Ganado (EVM).**Error! Bookmark not defined.**

Figura 2: Comportamiento de indicador SPI en el tiempo	18
Figura 3: Conceptos básicos EVM	22
Figura 4: Comportamiento CV vs SV	23
Figura 5: Comportamiento CPI vs SPI	23
Figura 6: Indicadores de Valor Ganado	24
Figura 7: Relación de precedencia	27
Figura 8: Forma correcta 1	27
Figura 9: Forma correcta 2	28
Figura 10: Factor de adherencia	31
Figura 11: Estado de Avance B	32
Gráfica 1: Promedio de precisión EAC (Proyectos con Ruta Crítica Favorable)	50
Gráfica 2: Promedio de precisión EAC (Proyectos con Ruta Crítica Desfavorable)	50
Imagen 1: Precisión de pronóstico simulado	44

Lista de Anexos

Anexo 1	58
Anexo 2	59
Anexo 3	62
Anexo 4	65

Lista de siglas

Sigla	Español	Inglés
EVM	Gestión del Valor Ganado	Earned Value Management
ES	Programación Ganada	Earned Schedule
CV	Variación de Costo	Cost Variance
CPI	Índice de Desempeño en Costo	Cost Performance Index

SV	Variación de Tiempo	Schedule Variance
SPI	Índice de Desempeño en Tiempo	Schedule Performance Index
Factor P	Factor de adherencia al cronograma	Schedule Adherence Factor
PV	Valor Planeado	Planned Value
AC	Costo Real	Actual Cost
BAC	Presupuesto al Completar	Budget at Competition

1. Introducción

2. Propósito y alineación estratégica

2.1 Propósito

Contribuir al mejoramiento del desempeño de los proyectos mediante el estudio de la incidencia del factor de adherencia y las actividades que hacen parte de la ruta crítica en la fecha de finalización de los proyectos.

2.2 Objetivos estratégicos de las organizaciones

El trabajo de grado pretende contribuir al desarrollo de la gerencia moderna de proyectos, dentro del marco académico institucional de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Profundizar en la teoría de la metodología de valor ganado y programación ganada, como parte del grupo de procesos de seguimiento y control, dentro de la gerencia moderna de proyectos, impartida en los centros de educación superior autorizados por el Ministerio de Educación Nacional (MEN). Esto, alineado con el objetivo estratégico del MEN de educar con pertinencia e incorporar innovación para una sociedad más competitiva.

Contribuir al desarrollo del conocimiento del grupo de procesos de seguimiento y control establecidos por el Project Management Institute¹ (PMI®), en el fomento de la gestión de proyectos.

3. Justificación

Como parte del grupo de procesos de la dirección de proyectos definido por el PMI® en el *Project Management Book of Knowledge* (PMBOK®), se encuentra el grupo de procesos de Monitoreo y Control. Estos son los “procesos requeridos para hacer seguimiento, analizar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios, y para iniciar los cambios correspondientes” (PMI,49. 2017).

En este grupo de proceso se pretende observar el comportamiento de la ejecución del proyecto y tomar decisiones que permitan corregir cualquier desviación que se esté presentando con respecto al plan definido. Como herramienta para esta información se recomienda el uso de la metodología de Gestión del Valor Ganado o *Earned Value Management* (EVM), tema sobre el cual versa la presente investigación.

4. Antecedentes

La Gestión del Valor Ganado (EVM) es una metodología creada en los años 60 y se utilizó inicialmente por el Ministerio de Defensa de los EE.UU. La característica destacable de esta práctica es que integra de una forma única tres aspectos del proyecto: la gestión del costo, la gestión del cronograma y la gestión del desempeño técnico; dentro de una única metodología. (Lipke, 2016). Esta herramienta es ampliamente utilizada para la medición del desempeño de los proyectos y permite identificar situaciones adversas, para tomar las medidas

¹ El Project Management Institute (PMI) es una de las asociaciones profesionales de miembros más grandes del mundo que cuenta con medio millón de miembros e individuos titulares de sus certificaciones en 180 países. Es una organización sin fines de lucro que avanza la profesión de la dirección de proyectos a través de estándares y certificaciones reconocidas mundialmente, a través de comunidades de colaboración, de un extenso programa de investigación y de oportunidades de desarrollo profesional (PMI, s.f.)

preventivas y correctivas apropiadas. De igual manera, permite pronosticar el comportamiento futuro de los proyectos de acuerdo con el desempeño transcurrido, el patrón de comportamiento y las tendencias presentadas.

El concepto de programación ganada (ES - *Earned Schedule*) fue introducido por Lipke (2003), quien presenta de forma análoga a los indicadores de costo (CV – *Cost Variance* y CPI – *Cost Performance Index*) y los indicadores para el tiempo conocidos como SV – *Schedule Variance* y SPI – *Schedule Performance Index*. De esta forma, se cuenta con una herramienta para el análisis del desempeño del tiempo transcurrido, así como la predicción y el pronóstico de la duración final de los proyectos. Henderson (2003) asiente en la validez de los indicadores de programación ganada ES, mediante un estudio realizado en un portafolio de seis proyectos con datos reales, donde estos indicadores presentan una mejor utilidad que los utilizados con la metodología de Gestión Valor Ganado (EVM).

De igual forma, Vanhoucke & Vandevoorde (2007) presentaron un estudio de investigación donde evaluaron la proyección a término de un proyecto bajo condiciones especiales, utilizando las métricas tradicionales de la gestión de valor ganado (EVM), junto con las métricas de la programación ganada (ES), evidenciando el mejor desempeño en el pronóstico cuando se utiliza esta última.

Por último, la nueva medida de la programación ganada, desarrollada por Walter Lipke, provee de información adicional a los gerentes de proyectos, con el fin de tomar mejores decisiones y aumentar la posibilidad de éxito en los mismos. Esta medida se conoce como Factor de Adherencia al Cronograma (Factor P), la cual permite mensurar qué tanto los trabajos realizados siguen la secuenciación de la línea base estipulada. Este factor permite maximizar el desempeño de los proyectos, disminuyendo la probabilidad de retrabajo y la demora en los entregables.

Sin duda, esta nueva variable mejora la capacidad de control del proyecto, proporcionando información adicional de advertencia temprana a los directores de proyecto, y permitiendo la identificación de la adherencia, es decir, que tanto las actividades se están ejecutando según se estableció en el

cronograma utilizado como base para calcular los indicadores de desempeño de la gestión de valor ganado (EVM) y la programación ganada (ES).

Las organizaciones modernas han adoptado la dirección organizacional de proyectos como marco de ejecución de las estrategias corporativas a través de la dirección de proyectos, la dirección de programas y dirección de portafolios (Lipke, 2016). Por tal razón, cobra cada vez mayor importancia el éxito de los proyectos, específicamente el éxito de la gerencia de proyectos, entendida como el cumplimiento de la triple restricción ampliada.

Un factor de éxito de la gerencia de proyectos es la planeación estricta y concienzuda, así como realizar un control y seguimiento preciso y detallado del avance de los proyectos, con el fin de determinar posibles desviaciones que requieran la toma de decisiones que permitan corregir el rumbo y ajustar el proyecto al plan inicial.

Por lo tanto, como apoyo al proceso de seguimiento y control de proyectos se han desarrollado metodologías como la Gestión del Valor Ganado (EVM), con la cual se mide, en términos de costos, los avances logrados en los proyectos en curso. A este indicador se suma la Gestión de la Programación Ganada (ES) con indicadores basados en tiempo, que permiten estimar una fecha de finalización de los proyectos con mayor precisión. Y el indicador más reciente corresponde al Factor de Adherencia al Cronograma (Factor P), el cual indica que tan ajustado ha sido la ejecución del proyecto con respecto a la programación original. En conjunto la gestión de la programación ganada (EVM), la programación ganada (ES) y el factor de adherencia al cronograma (Factor P) ofrecen información certera sobre el estado de avance del proyecto y adicionalmente, la posibilidad de pronosticar el comportamiento futuro de este en términos de tiempo y costo.

En el caso particular de aquellos proyectos que tienen algunas tareas adelantadas y otras atrasadas, se ha encontrado que presentan un valor ganado (EV) favorable, dado que las tareas adelantadas compensan los atrasos de las otras. Revisando únicamente este indicador, podría llevar al gerente de proyecto a la toma de decisiones inconvenientes para el proyecto o, peor aún, a la no toma de decisiones por aparentar un avance adecuado del proyecto. Sin embargo, el Factor

P mostrará una baja adherencia al cronograma que indica una ejecución alejada de la planeación inicial, por lo tanto, el gerente de proyecto podrá tomar mejores decisiones utilizando información más confiable.

Al respecto, Lipke ha desarrollado nuevas herramientas como el valor ganado efectivo (EV(e)) que permite comparar la distribución real del valor ganado en las tareas con la ejecución planificada y, así mismo, observar las diferencias y clasificarlas como impedimentos, limitaciones o retrabajo. (2016).

A pesar de los avances descritos, el área de conocimiento relacionado con mejorar la precisión de las estimaciones de las fechas de terminación de los proyectos se encuentra en proceso de evolución y a la espera de nuevos aportes que apoyen la toma de decisiones más acertadas por parte de los gerentes de proyecto, usando nuevas herramientas para mejorar el desempeño de estos.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Estudiar cómo mejorar la estimación de la proyección a término de los proyectos, utilizando el Factor de Adherencia al Cronograma (Factor P) y las actividades que forman parte de la ruta crítica.

5.2 Objetivos específicos

- Estudiar la metodología gestión de valor ganado (EVM), programación ganada (ES) y Factor de Adherencia al Cronograma (Factor P), con el fin de tener una base conceptual sólida actualizada para la aplicación en el desarrollo de la investigación.
- Plantear una hipótesis que busque mejorar la estimación a término de los proyectos.
- Validar la hipótesis con la información de la base de datos de proyectos reales.
- Presentar una propuesta que mejore la estimación.

6. Marco teórico

6.1 Gestión de Valor Ganado – *Earned Value Management (EVM)*.

El concepto de valor ganado (EV) fue inicialmente utilizado por los ingenieros industriales de los Estados Unidos, que trabajaban en las fábricas de productos comerciales y lo usaban para administrar sus costos de producción.

A comienzos de los años 60, este concepto fue empleado en la administración de pequeños proyectos de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. A mediados de esa década, fue implementado formalmente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, y ha sido aplicado por ese gobierno y por los gobiernos de otros países por más de 30 años. (Fleming & Koppelman, 1999).

Esta metodología integra tres aspectos fundamentales de la gerencia de proyectos: alcance, tiempo y costo. Además, permite identificar situaciones adversas y tomar las medidas preventivas y correctivas y apropiadas. De igual manera, permite pronosticar el costo y el tiempo al terminar el proyecto, de acuerdo con el desempeño transcurrido, el patrón de comportamiento y las tendencias presentadas (Anbari, 2003).

Su implementación permite conocer de manera anticipada si se presenta un adelanto o un atraso en el proyecto, si los recursos se están usando de manera eficiente, si se presenta un ahorro o sobre costo en el proyecto, si el tiempo transcurrido ha sido empleado eficientemente. Permite también pronosticar la fecha de terminación y su costo estimado al terminar el proyecto. La gestión de valor ganado (EVM) basa su análisis en los conceptos definidos a continuación:

Valor planificado o *Planned Value (PV)*: Es el valor planificado del proyecto establecido como la línea base y expresado gráficamente en el eje Y del presupuesto acumulado del proyecto, y, en el eje X, el tiempo total del mismo. El valor planificado

puede referirse a una actividad o paquete de trabajo, entendido como el trabajo representado en los componentes de más bajo nivel de cada rama de la estructura de desglose del trabajo *Work Breakdown Structure* (WBS) (Anbari, 2003). Esta gráfica es conocida como “Curva – S”. En la literatura, también es conocido como el Costo Presupuestado del Trabajo Programado o en inglés, *The Budgeted Cost Of Work Scheduled – BCWS*.

Valor Ganado o *Earned Value* (EV): Es el valor acumulado del trabajo realizado en determinado momento del proyecto. En la literatura también es conocido como el Costo Presupuestado del Trabajo Realizado o en inglés, *The Budgeted Cost Of Work Performed* (BCWP). Matemáticamente se expresa como el porcentaje completado por el presupuesto total (actividad o paquete de trabajo).

Costo Real o *Actual Cost* (AC): Es el costo real acumulado incurrido para lograr el trabajo realizado, ya sea de la actividad o paquete de trabajo en un determinado momento del Proyecto. También conocido en la literatura como *The Actual Cost Of Work Performed* (ACWP).

Presupuesto al Completar o *Budget at Completion* (BAC): Es el presupuesto total acumulado y el punto final de la Curva – S.

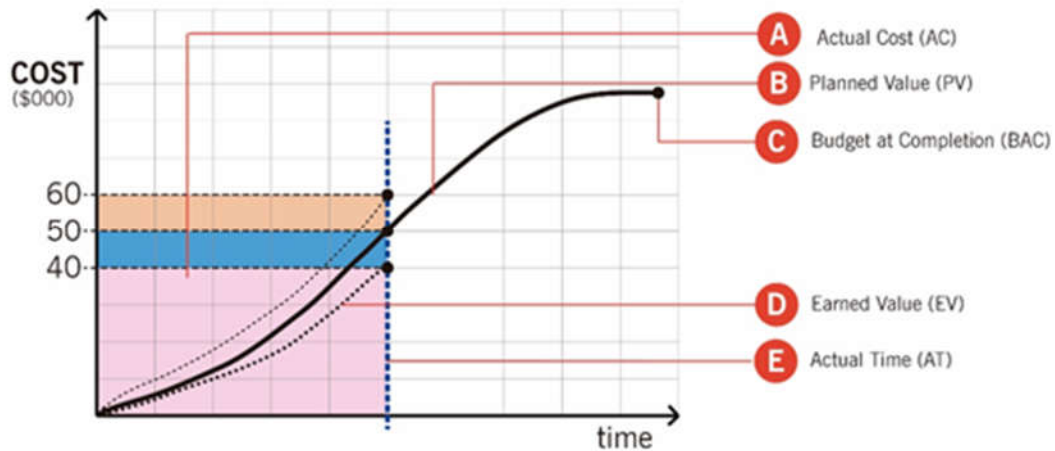
En la Figura 1 se pueden observar los conceptos definidos anteriormente. Para mejor comprensión, supongamos un proyecto que presenta un presupuesto al completar de \$100.000. En una determinada fecha el avance del proyecto presenta los siguientes datos:

Valor planificado (PV): \$ 50.000

Valor Ganado (EV): \$ 40.000

Costo real (AC): \$60.000.

Figura 1: Metodología de Gestión de Valor Ganado (EVM).



6.2 Medición del Desempeño

La medición del desempeño del proyecto basa su análisis en los conceptos definidos con anterioridad e incluyen variaciones, porcentajes de variación e índices de desempeño y pronósticos. A continuación, se explican con mayor detalle:

6.2.1 Variaciones

Diferencia en costo o variación en costo o *Cost Variance (CV)*: La variación en costo o *Cost Variance (CV)* se puede expresar matemáticamente como la diferencia entre el valor ganado (EV) y el costo real (AC), para una determinada fecha de avance del proyecto. Como se mencionó anteriormente y de acuerdo con la Gráfica 1, los valores utilizados en la fórmula son acumulados.

$$CV = EV - AC$$

$$CV = \$40.000 - \$60.000$$

$$CV = -\$20.000$$

Significa que, a la fecha, el proyecto presenta un sobre costo de \$ 20.000 pesos.

Diferencia en tiempo o variación en tiempo o *Schedule Variance*

(SV): variación en tiempo o *Schedule Variance* se puede expresar matemáticamente como la diferencia entre el valor ganado (EV) y el valor planificado (PV) para una determinada fecha de avance.

$$SV = EV - PV$$

$$CV = \$40.000 - \$50.000$$

$$CV = -\$10.000$$

De lo anterior se diría que el proyecto presenta un atraso de \$10.000, lo que en principio no tiene sentido al no estar expresado en unidades de tiempo (Corovic, 2007). Sin embargo, Anbari (2003) describe el método del valor planificado (PV) como un concepto adicional para identificar y medir de mejor forma el atraso que se presenta. Se define entonces la tasa del valor planificado (PV Rate) por periodo de tiempo, es decir:

$$\text{"PV Rate"} = \frac{BAC}{Unidad\ de\ tiempo}$$

Considerando que el proyecto estuviera conformado por 40 semanas, la tasa de valor planificado se calcula a continuación

Tasa de Valor Planificado o *PV Rate*:

$$\text{"PV Rate"} = \frac{\$100.000}{40} = \$2.500$$

Posteriormente, para calcular la variación en unidades de tiempo o *Time Variance* (TV) se calcula la variación en tiempo (SV) sobre la tasa del valor planificado por periodo (*PV Rate*):

$$TV = \frac{SV}{PV\ Rate}$$

$$TV = \frac{-\$10.000}{2.500} = -4\ semanas$$

De acuerdo con lo anterior, el proyecto se encuentra atrasado en 4 semanas.

6.2.2 Porcentajes de Variación

Los porcentajes de variación se basan en los valores acumulados para cada una de las variables definidas con anterioridad.

Porcentaje de variación en costo o *Cost Variance Percent (CV% - CVP)*: Es una medida de la variación en costo con relación al valor ganado (EV) para una determinada fecha de estado. Matemáticamente se calcula como:

$$CV\% (CVP) = \frac{CV}{EV} * 100\%$$

Para el ejemplo tenemos:

$$CV\% (CVP) = \frac{\$ - 20.000}{\$ 40.000} * 100\%$$

$$CV\% (CVP) = -50\%$$

Este resultado indica que el proyecto se encuentra con un sobrecosto del 50% a la fecha.

Porcentaje de variación en tiempo o *Schedule Variance Percent (SV% - SVP)*:

Es una medida del progreso del proyecto con relación al cronograma. Matemáticamente se calcula como:

$$SV\% (SVP) = \frac{SV}{PV} * 100\%$$

Para el ejemplo tenemos:

$$SV\% (SVP) = \frac{\$ - 10.000}{\$ 50.000} * 100\%$$

$$SV\% (SVP) = -20\%$$

El resultado indica que el proyecto presenta un 20% de atraso con respecto al cronograma establecido.

También es posible calcular este indicador con relación al valor ganado (EV). En este caso, se reemplaza el valor ganado (EV) por el valor planificado (PV) en el denominador.

Para el ejemplo tenemos:

$$SV\% (SVP) = \frac{SV}{EV} * 100\%$$

$$SV\% (SVP) = \frac{\$ - 10.000}{\$ 40.000} * 100\%$$

$$SV\% (SVP) = -25\%$$

Este resultado indica que el proyecto presenta un 25% de atraso con respecto al cronograma establecido. También se puede interpretar como la variación de la programación en el momento que se ha realizado el trabajo medido en una determinada fecha de avance del proyecto.

6.2.3 Índices de Desempeño

Índice de desempeño en costo o *Cost Performance Index* (CPI):

Este índice es una medida de la eficiencia del dinero invertido en el proyecto. Matemáticamente se calcula como la relación entre el valor ganado (EV) y el costo real (AC)

$$CPI = \frac{EV}{AC}$$

Para el ejemplo tenemos:

$$CPI = \frac{\$ 40.000}{\$ 60.000}$$

$$CPI = 0.67$$

Se puede interpretar que por cada unidad monetaria invertida en el proyecto se producen 67 céntimos de trabajo ejecutado, en una determinada fecha del proyecto.

Índice de desempeño en tiempo o *Schedule Performance Index* (SPI):

Este índice es una medida del progreso del proyecto con relación al plan establecido. Matemáticamente se calcula como la relación entre el valor ganado (EV) y el valor planificado (PV):

$$SPI = \frac{EV}{PV}$$

Para el ejemplo tenemos:

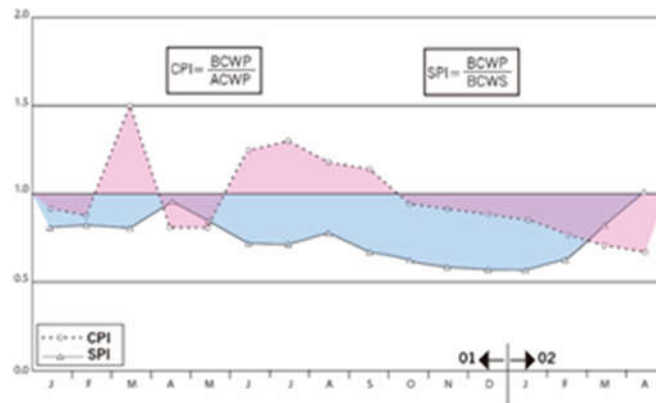


Figura 2: Comportamiento de indicador SPI en el tiempo

$$SPI = \frac{\$ 40.000}{\$ 50.000}$$

$$SPI = 0.80$$

Se puede interpretar que por cada unidad de tiempo ha sido efectivo el 80% de este tiempo.

6.2.4 Pronósticos

Predecir la fecha de terminación y el costo al final del proyecto es una de las decisiones más difíciles para los directores de proyecto. La gestión de valor ganado (EVM) permite calcular estas variables de acuerdo con el desempeño del proyecto en una determinada fecha de avance o estado (Anbari, 2003).

A continuación, se explica este concepto en relación con el costo. Sobre los pronósticos de tiempo se hablará más adelante.

El Estimado al Terminar o *Estimate At Completion* (EACs) en costo puede calcularse de acuerdo con tres diferentes consideraciones, y tiene como base el costo real (AC) o incurrido en una determinada fecha de avance del proyecto, más

un remanente conocido como Estimado para Completar o *Estimate To Complete* (ETC).

Estimado al terminar en costo – consideración n°1:

Cuando en una determinada fecha de avance del proyecto, el análisis indica que, de acuerdo con el desempeño del mismo, no es posible predecir una tendencia futura, se necesita calcular un nuevo estimado para completar (ETC).

$$EAC_{\$} = AC + ETC$$

Estimado al terminar en costo - consideración #2:

Cuando en una determinada fecha de avance del proyecto, el análisis indica que su desempeño no será similar al desempeño restante, es decir, que las situaciones adversas que se presentaron en el pasado no se repetirán de nuevo; el estimado al terminar (ETC) será calculado como la suma del costo real (AC) y el presupuesto del trabajo remanente. Matemáticamente se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$EAC_{\$} = AC + (BAC - EV)$$

Para el ejemplo tenemos:

$$EAC_{\$} = \$ 60.000 + (\$ 100.000 - \$ 40.000)$$

$$EAC_{\$} = \$ 120.000$$

La fórmula anterior también puede simplificarse de la siguiente manera:

$$EAC_{\$} = AC + (BAC - EV)$$

$$EAC_{\$} = BAC + (AC - EV)$$

$$EAC_{\$} = BAC - (EV - AC)$$

$$EAC_{\$} = BAC - CV$$

Es decir, el presupuesto al terminar menos la variación costo

$$EAC_{\$} = \$ 100.000 - (\$ - 20.000)$$

$$EAC_{\$} = \$ 120.000$$

Estimado al terminar en costo - consideración #3:

Cuando en una determinada fecha de avance del proyecto, el análisis indica que su desempeño continuará presentándose en el futuro, el Estimado al Terminar o *Estimate to Complete* (ETC) será calculado como la suma del costo real (AC) y el presupuesto del trabajo remanente afectado por un factor de desempeño o *Performance Factor* (PF). En este caso, consideremos el factor de desempeño (PF) como el índice de desempeño en costo o *Cost Performance Index* (CPI). Matemáticamente se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$EAC_{\$} = AC + \frac{BAC - EV}{CPI}$$

Para el ejemplo tenemos:

$$EAC_{\$} = \$60.000 + \frac{(\$100.000 - \$40.000)}{0.67}$$

$$EAC_{\$} = \$60.000 + \$90.000$$

$$EAC_{\$} = \$150.000$$

La fórmula anterior también puede simplificarse de la siguiente manera:

$$EAC_{\$} = AC + \frac{(BAC - EV)}{CPI}$$

$$EAC_{\$} = AC + \frac{BAC}{CPI} - \frac{EV}{CPI}$$

$$EAC_{\$} = AC + \frac{BAC}{CPI} - AC$$

$$EAC_{\$} = \frac{BAC}{CPI}$$

Es decir, el presupuesto al terminar (BAC) dividido en el índice de desempeño en costo (CPI)

$$EAC_{\$} = \frac{\$100.000}{0.67}$$

$$EAC_{\$} = \$150.000$$

6.2.5 Variación al terminar o *Variance At Completion* (VAC):

La Variación al Terminar es un indicador que muestra sobrecostos o ahorros en el presupuesto del proyecto. Un valor negativo indica que el presupuesto terminará con sobrecosto y un valor positivo que el presupuesto tendrá un ahorro. Matemáticamente se puede expresar como:

$$VAC_{\$} = BAC - EAC$$

Para el ejemplo anterior y considerando un $EAC = \$ 150.000$, tenemos:

$$VAC_{\$} = \$100.000 - \$150.000$$

$$VAC_{\$} = -\$50.000$$

Indica entonces que el proyecto terminará con un sobre costo de \$50.000.

6.3 Deficiencia en los indicadores de tiempo de la metodología de Gestión de Valor Ganado (EVM)

El análisis de desempeño del proyecto se relaciona con la eficiencia en la cual se está desarrollando el producto del proyecto, esto, a través de la eficiencia en costo y en tiempo, y teniendo en cuenta que la medición del alcance del proyecto durante el proceso de ejecución es más difícil (Corovic, 2007).

El fundamento de la gestión de valor ganado (EVM) se centra en el costo. Como se puede apreciar en la Figura 3, la curva del valor planificado o *Planned Value* (PV) es el costo acumulado de las actividades del proyecto, representado el costo en el eje Y; y el tiempo en el eje X.

La variación del costo (CV), como se explicó anteriormente, corresponde a la diferencia entre el valor ganado (EV) y el costo real (AC), la cual es proyectada sobre el eje Y de la gráfica. Sin embargo, se esperaría que la variación en tiempo, cuya diferencia corresponde al valor ganado (EV) y al valor planificado (PV),

estuviera proyectada en el eje X, pero gráficamente, esta diferencia está proyectada en el eje Y, el cual representa el costo del proyecto, como se puede ver en la siguiente gráfica (Corovic, 2007).

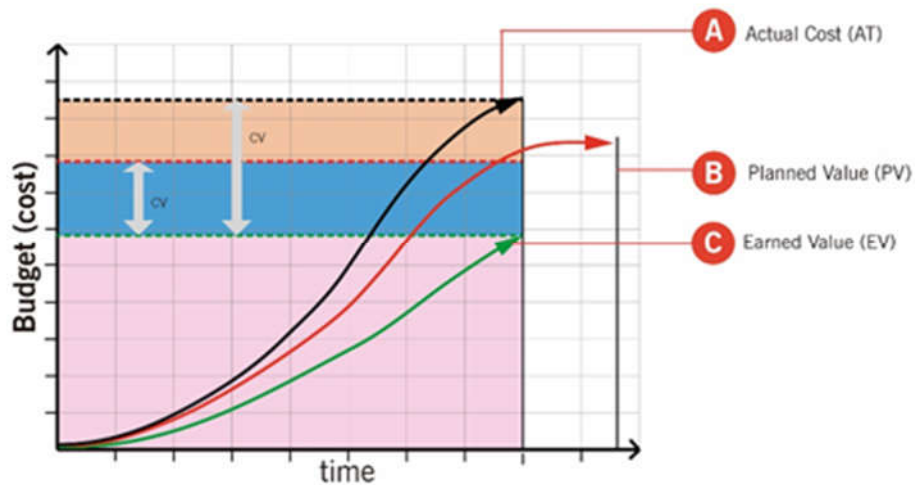


Figura 3: Conceptos básicos EVM

Lo anterior ha sido expresado por varios autores (Lipke, 2003 y Vandevoorde & Vanhoucke, 2006), quienes argumentan la debilidad de la metodología de la gestión de valor ganado (EVM), especialmente el índice de desempeño en tiempo como predictor de la duración del proyecto, en cuyo caso, este índice debería ser usado como una alerta y no como una herramienta real para analizar el desempeño en tiempo del proyecto (Corovic, 2007). Allí explica en mayor detalle el comportamiento de este indicador, en proyectos cuya curva de costo acumulada es no lineal. De esta forma concluye que “la no linealidad de la curva acumulada de costos es la principal causa de distorsión de los indicadores de tiempo de la metodología de valor ganado”. (Corovic, pag.5, 2007).

La deficiencia que se ha identificado en los indicadores de valor ganado (EV) ha incentivado a diferentes autores a crear nuevas metodologías que ofrezcan mayor precisión en las estimaciones a término de los proyectos. Aparecen entonces nuevas metodologías basadas en la gestión de valor ganado (EVM) como la gestión

de la duración ganada o *Earned Duration Management* (EDM) (Khamooshi & Golafshani, 2014), programación ganada o *Earned Schedule* (ES) (Lipke, 2003) y Suavización Exponencial o *Exponential Smoothing-based Method* (XSM) (Batselier & Vanhoucke, 2017).

6.4 Programación Ganada o *Earned Schedule* (ES)

El concepto de la programación ganada (ES) fue desarrollado por Walter H. Lipke en el año 2003; y surge como una derivación de la metodología de gestión de valor ganado (EVM).

Los indicadores variación en tiempo (SV) y el índice de desempeño en tiempo (SPI) de la gestión valor ganado (EVM) basan su análisis en el valor ganado (EV) y el valor planificado (PV), los cuales están basados en el costo de las actividades o paquetes de trabajo; y no en unidades de tiempo.

De acuerdo con Lipke (2003) y según las Figuras 4 y 5, los indicadores variación del costo (CV) y el índice de desempeño del costo (CPI) tienen un comportamiento diferente a los indicadores variación en tiempo (SV) y el indicador de desempeño en tiempo (SPI). La variación en costo (CV) y el índice de desempeño en costo (CPI) parecen establecer una tendencia con alguna variación y, al igual que los indicadores de tiempo, siguen un comportamiento similar hasta el punto en el cual la variación de tiempo llega al valor de cero y al valor de uno para el indicador del índice de desempeño. Esta situación se presenta para los proyectos que tienen su finalización más tarde de lo planeado.

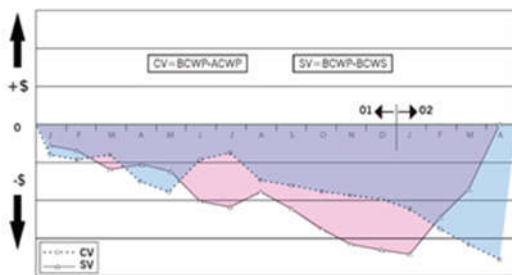


Figura 4: Comportamiento CV vs SV

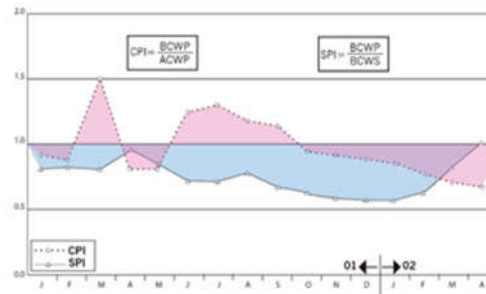


Figura 5: Comportamiento CPI vs SPI

Este extraño comportamiento, como lo explica Lipke (2003) en su artículo "*Schedule is Different*", se debe a que los indicadores de costo, es decir, la variación en

costo y el índice de desempeño en costo están referenciados al costo real (AC), mientras que la variación en tiempo y el índice de desempeño en tiempo están referenciados con el valor planificado (PV).

De acuerdo con la Figura 3 (Conceptos Básicos de EVM), el punto final de la curva del valor planificado (PV) es el presupuesto planeado del proyecto o *Budget at Completion* o presupuesto al terminar (BAC). El punto final de la curva de valor ganado (EV) es también el presupuesto al terminar. De esta forma, en la etapa final del proyecto, el valor ganado (EV) se acerca al valor planificado (PV) y por esto, la variación en tiempo (CV) al final del proyecto es igual a cero ($EV = PV$) y el índice de desempeño en tiempo (SPI) es igual a la unidad.

Para resolver esta debilidad de los indicadores de valor ganado (EV) con respecto al tiempo, se crea el concepto de la Programación Ganada o *Earned Schedule (EV)*, pues “la idea es determinar el tiempo en el que EV devengado debería haberse dado” (Lipke, 2016). Para comprender mejor esto, observemos la siguiente gráfica:

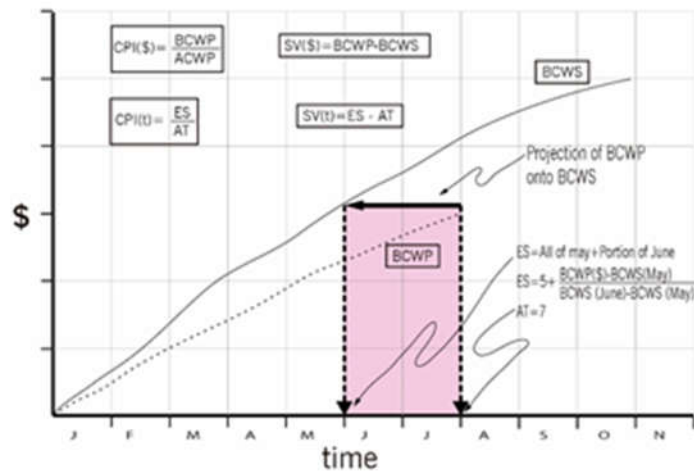


Figura 6: Indicadores de Valor Ganado

En la gráfica anterior se puede observar que para una determinada fecha de avance del proyecto, conocida como fecha real o *Actual Time (AT)*, el proyecto tiene un valor ganado (EV). Desde una perspectiva gráfica, la programación ganada (ES) se determina proyectando de manera horizontal el valor ganado (EV),

hasta encontrar el punto de la curva del valor planificado (PV), y luego proyectando verticalmente al eje horizontal. Usualmente la programación ganada (ES) es determinada en periodos de tiempo (días, semanas, meses).

En forma similar a los indicadores de valor ganado (EV) se pueden definir los de programación ganada (ES) como se explica a continuación:

Variación en tiempo: La variación en tiempo se calcula como la diferencia entre la programación ganada (ES) y la fecha real (AT)

$$SV_t = ES - AT$$

Índice de desempeño en cronograma: El índice de desempeño en tiempo o *Schedule Performance Index* (SPI) se determina como la relación entre la programación ganada (ES) y la fecha real (AT):

$$SPI = \frac{ES}{AT}$$

Estimado al terminar en tiempo - consideración #1: Cuando en una determinada fecha de avance del proyecto, el análisis indica que de acuerdo con el desempeño del proyecto no es posible predecir una tendencia futura, se necesita calcular un nuevo estimado para completar (ETC).

$$EAC_t = AT + ETC$$

Estimado al terminar en tiempo - consideración #2: Cuando en una determinada fecha de avance del proyecto, el análisis indica que el desempeño que lleva el proyecto no será similar al desempeño restante, es decir, que las situaciones adversas que se presentaron en el pasado no se repetirán nuevamente, el estimado al terminar será calculado como la suma de la fecha real (AT), más el tiempo planeado del trabajo remanente. Matemáticamente se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$EAC_t = AT + (PD - ES)$$

En donde PD es la duración del plan o *Plan Duration*

La fórmula anterior también puede simplificarse de la siguiente manera:

$$EAC_t = AT + (PD - ES)$$

$$EAC_t = PD + (AT - ES)$$

$$EAC_t = PD - (ES - AT)$$

$$EAC_t = PD - SV_t$$

Estimado al terminar en tiempo - consideración #3: Cuando en una determinada fecha de avance del proyecto, el análisis indica que el desempeño que lleva el proyecto continuará presentándose en el futuro, el estimado al terminar será calculado como la suma de la fecha real (AT) más el tiempo del trabajo remanente afectado por un factor de desempeño o *Performance Factor* (PF), en este caso consideremos el factor de desempeño como el índice de desempeño en tiempo (SPI_t). Matemáticamente, se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$EAC_t = AT + \frac{(PD - ES)}{SPI_t}$$

La fórmula anterior también puede simplificarse de la siguiente manera:

$$EAC_t = AT + \frac{(PD - ES)}{SPI_t}$$

$$EAC_t = AT + \frac{PD}{SPI_t} - \frac{ES}{SPI_t}$$

$$EAC_t = AT + \frac{PD}{SPI_t} - AT$$

$$EAC_t = \frac{PD}{SPI_t}$$

Variación al terminar o *Variance At Completion* (VAC_t): La variación al terminar (VAC_t) es un indicador que muestra adelantos o atrasos en el cronograma del proyecto. Un

valor negativo indica que el proyecto terminará atrasado y un valor positivo, que terminará adelantado. Matemáticamente se puede expresar como:

$$VAC_t = PD - EAC_t$$

6.5 Método de la Ruta Crítica o *Critical Path Method* (CPM)

Para hablar del método de la ruta crítica es necesario primero tener claro el concepto del diagrama de flechas, el cual permite definir relaciones de precedencia y dependencia que determina que actividades deben terminarse para iniciar otras.

Este concepto utiliza una simbología propia que se basa en tres iconos:

- A) Círculos de eventos (instantes)
- B) Flechas que son actividades
- C) Líneas entrecortadas que son actividades falsas

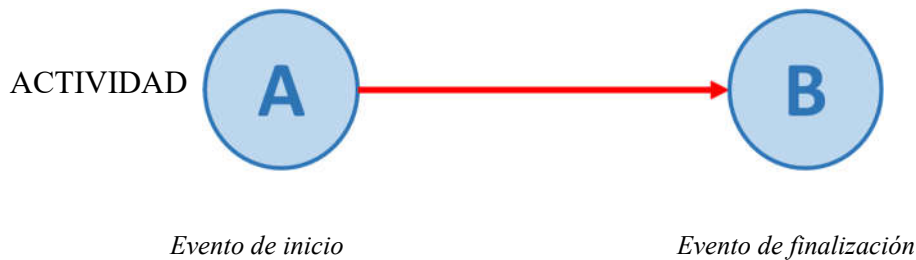


Figura 7: Relación de precedencia

Este diagrama de red está caracterizado por varias reglas. La primera es que una actividad está representada por una sola y única flecha, igualmente dos actividades iguales no pueden ser identificadas con los mismos eventos de inicio y finalización, evento en el cual aparecen las actividades falsas, que se representan con líneas entrecortadas.

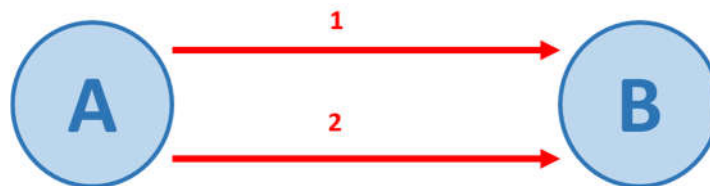


Figura 8: Forma correcta 1

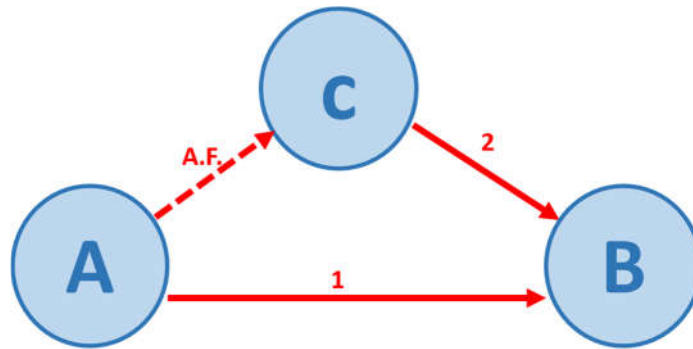


Figura 9: Forma correcta 2

De este concepto básico, nace esta herramienta que ayuda al control en la ejecución de los proyectos y está íntimamente ligado a las barras diseñadas por el ingeniero Henry Gantt (1861-1919). Este cronograma de actividades se utiliza en las operaciones que requieren planificación y estimaciones temporales.

Este modelo de red es considerado determinista, mientras que la técnica de revisión y evaluación de programas (PERT, por sus siglas en inglés), es considerado un método de red probabilística.

La técnica de la ruta crítica (CPM) identifica y trabaja con la duración de las actividades, las precedencias y dependencias y, junto con las actividades ficticias, genera una red o cadena de flujo que organiza en forma lógica de acuerdo con el oficio y a la secuenciación de las actividades. Luego identifica las actividades que no tienen holgura, trazando por allí el importante concepto de la ruta crítica (CPM), ya que entiende el método que esta línea de actividades es de gran importancia para que el proyecto llegue a término según las estimaciones.

La identificación de las actividades sin holgura que constituyen la ruta crítica se encuentra definiendo la ocurrencia temprana del evento de inicio subsiguiente y así se lleva hasta el final de las actividades en el evento final de cierre, pero siempre tomando el valor mayor, en caso de presentar varias dependencias con diferentes duraciones. Paso siguiente, se identifica la ocurrencia tardía de las actividades bajo el mismo método, iniciando con el evento de cierre del cual se toma su mayor valor, pero, esta vez, en lugar de sumas realizamos restas. En este momento, tendremos dos valores para cada flecha (actividad): la

iniciación temprana y la iniciación tardía, y acá se encuentra toda la información necesaria para identificar la ruta crítica del proyecto.

El siguiente paso para establecer la ruta crítica es realizar la operación de resta entre los valores asignados para iniciación temprana y tardía. Así mismo, efectuar las operaciones que tengan como resultado cero "0", pues son las que constituyen la ruta crítica, ya que la iniciación temprana y la tardía confluyen en el mismo valor, que puede ser interpretado como mismo día u hora de inicio.

Con el avance del tiempo, la tecnología hizo importantes aportes a la técnica, pues y aparecieron herramientas computacionales que hacen más pragmático el trabajo, y ayudan a los temas de secuenciación de manera más efectiva e identifican las actividades críticas del proyecto. Sin embargo, es muy importante entender que la base de esta solución tecnológica son los conceptos emanados de los diagramas de flechas y de las incorporaciones que creó Henry Gant.

6.6 Adherencia al Cronograma

El cronograma del proyecto es el resultado del proceso de identificar y secuenciar las actividades, de estimar los recursos, la duración y el costo necesarios para llevarlas a cabo. Igualmente, es el producto de considerar las restricciones y limitaciones asociadas, es decir, es el plan que permitirá el seguimiento y control del proyecto durante su ejecución. Según Lipke (2008), suponiendo que el cronograma es la ruta más eficiente para ejecutar el proyecto, cualquier desviación que se presente generará ineficiencias, además de periodos de inactividad, baja calidad del producto, e incluso retrabajo de algunas actividades. Así las cosas, el cronograma es considerado el documento más importante en relación con el éxito del proyecto y comparado con cualquier otro aspecto de este.

De acuerdo con lo anterior, se deriva una nueva medida llamada el "Factor de Adherencia al Cronograma", el cual permite a los directores de proyecto tener una mejor comprensión de qué tan bien la ejecución del proyecto sigue la secuencia y el plan establecido como referencia. Tener un indicador de "cumplimiento del cronograma"

proporciona información adicional de alerta temprana para que los directores actúen durante la ejecución. (Lipke, 2008).

Adicionalmente, como lo menciona Lipke (2008), los indicadores de la metodología del valor ganado son indicadores de la medida del desempeño, pero no proporcionan información sobre la forma en que se logran los objetivos como hitos e incluso el valor ganado. Por ejemplo, si para una determinada fecha de estado de avance del proyecto, la línea base indica que se debieron haber completado dos hitos, no es posible saber si estos hitos son consecutivos (por ejemplo; hitos hi y hj), pues pudieron haber sido los hitos hi y hk. (Lipke, 2016)

De igual forma sucede con el índice de desempeño del cronograma(SPI {EV / PV}); en una determinada fecha de estado de avance, el indicador podría ser igual o muy cercano a 1, es decir, que el valor ganado (EV) es igual o aproximadamente el valor planificado (PV), pero no es posible determinar si ese valor ganado es el que corresponde al plan (Lipke, 2008).

No solo basta con tener un desempeño eficiente en la ejecución de los proyectos, es necesario también saber cómo se van desarrollando las actividades, La adherencia al cronograma permite identificar que tan bien se están ejecutando las actividades según lo planeado. De esta forma, se puede maximizar el desempeño de proyecto y minimizar los reprocesos y la entrega de productos defectuosos.

6.6.1 Factor de Adherencia o Factor P

El concepto de factor de adherencia puede entenderse de acuerdo con las Figura 9.

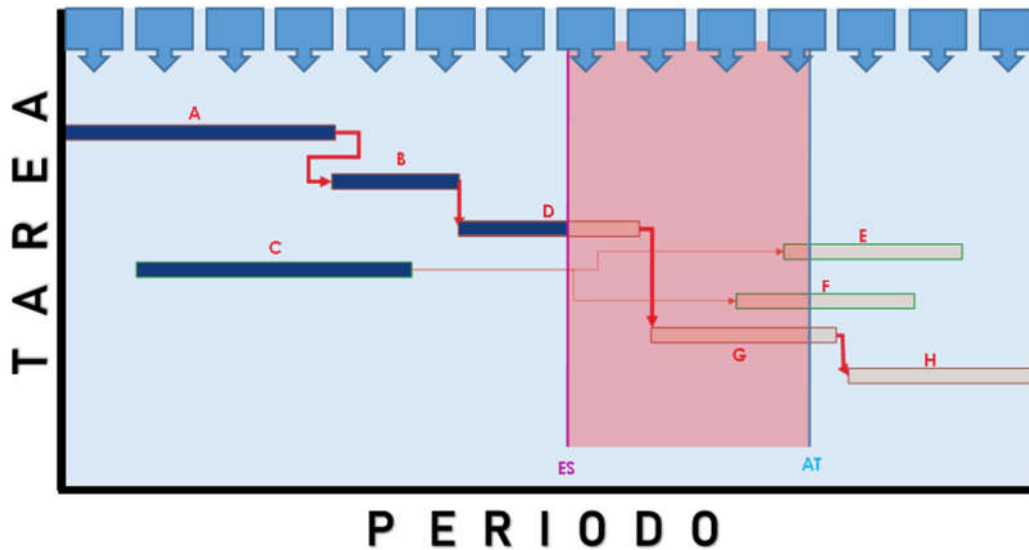


Figura 10: Factor de adherencia

Se pueden apreciar una serie de actividades que forman parte de un cronograma de un proyecto. De acuerdo con la teoría de la programación ganada (ES), la fecha real (AT) es la fecha de avance y programación ganada (ES) es la fecha en la cual el valor ganado (EV) en el instante de la fecha real (AT) debió haberse dado. En esta situación, las actividades A, B y C presentan un avance de ejecución del 100%, mientras que las actividades E, F, G y H, aún no han comenzado. La actividad D lleva un determinado porcentaje de avance, sin embargo, para la fecha real (AT), ésta ya debió haber terminado. En este caso, el valor sombreado de las actividades representa el valor ganado que se encuentra en sincronía con el plan, o sea, el valor ganado correspondiente a la fecha de la programación ganada. Nótese que el valor planificado (PV) en la fecha de la programación ganada (ES) es igual al valor ganado (EV) en la fecha real (AT).

En la siguiente gráfica, Figura 10, se puede observar que para la fecha real (AT) las actividades A y B se han ejecutado en un 100%, y las actividades C y D no se han completado, presentando un atraso, el cual podría deberse a una limitación, a una restricción o a un deficiente desempeño (W. Lipke, 2012). Las actividades E y F presentan un adelanto, mientras que las actividades G y H aún no han comenzado.

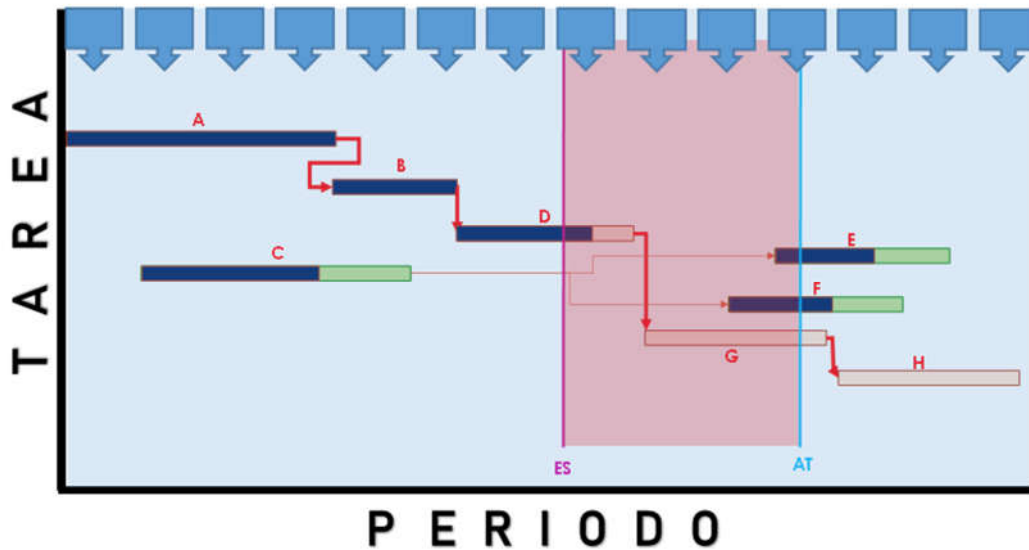


Figura 11: Estado de Avance B

En este caso, el valor sombreado de las actividades representa el valor ganado (EV), que, para este caso, es el equivalente al valor ganado de la Figura 10. A diferencia del anterior, se puede apreciar que su distribución no es la misma, parte del valor ganado (EV) se encuentra a la derecha de la programación ganada (ES) y parte a la izquierda, lo que significa que se encuentra en actividades adelantadas y atrasadas respectivamente.

El factor de adherencia al cronograma (Factor P) se puede definir como la proporción entre la porción de valor ganado (EV), que se encuentra en concordancia con el cronograma, y el valor planificado (PV) al momento de la programación ganada (ES) (Lipke, 2016). La fórmula se puede expresar matemáticamente como:

$$P = \frac{\sum EV_j}{\sum PV_j}$$

“Donde PV_j representa el valor planificado de una tarea asociado al valor de ES. El subíndice “j” representa cada una de las tareas del cronograma que están comprendidas en la realización planificada. EV_j es el valor ganado de la “j”, limitado por el valor atribuido a las tareas planificadas, PV_j ”. (Lipke, 2016)

Otros autores, como Vanhoucke (2013), definen el factor de adherencia al cronograma (Factor P) como la sumatoria del valor mínimo entre el valor planificado (PV) de las actividades en el instante de la programación ganada (ES) y el valor ganado (EV) en ese mismo instante, sobre la sumatoria del valor planificado (PV) en el instante de la programación ganada (ES). Esta definición se aprecia en la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\sum_{i \in N} \min(PV_{i,ES}; EV_{i,AT})}{\sum_{i \in N} PV_{i,ES}}$$

N = serie de actividades de un cronograma.

$PV_{i,ES}$ = valor planificado de la actividad i en el instante ES.

$EV_{i,AT}$ = valor ganado de la actividad i en el instante AT.

6.7 Programación Ganada en la Ruta Crítica

La programación ganada (ES), desde sus inicios en el año 2003, ha sido ampliamente utilizada como herramienta para la medición del desempeño de los proyectos, sin embargo, se ha creado la percepción de que solamente puede ser utilizada para la totalidad del proyecto. La programación ganada (ES) determina la fecha en la cual el valor ganado (EV) de la fecha en que se analiza el proyecto debió haberse dado. Para ello, es necesario contar con la línea base del proyecto o PMB.

De acuerdo con Lipke (2006) la programación ganada (ES) no se limita a la totalidad del proyecto y puede ser aplicada a cualquier nivel de interés dentro del proyecto, incluyendo paquetes de trabajo, cuentas de control e incluso actividades de la ruta crítica. En el caso de la ruta crítica, lo que se debe hacer es considerarla como la totalidad del proyecto, es decir, se debe establecer una línea base acumulativa con las actividades críticas. Una vez se tengan las actividades separadas y consideradas como la totalidad del proyecto, la metodología de programación ganada (ES), al igual que sus métricas e indicadores, pueden ser aplicados.

6.8 Adherencia al cronograma y el retrabajo

La adherencia al cronograma nos permite identificar qué tan bien las actividades se están ejecutando de acuerdo con el plan propuesto. Una mala adherencia al cronograma puede generar ineficiencia en el desempeño restante del desarrollo del proyecto, productos de mala calidad e incluso defectuosos. Aquellas actividades adelantadas se deben a impedimentos, restricciones o a una mala disciplina en su ejecución. Con frecuencia, estas son ejecutadas sin información completa, es decir, los *inputs* necesarios para comenzar estas actividades son anticipados y no presentan realmente un valor ganado (EV) asociado; es más, existe una probabilidad de que el trabajo realizado tendrá que repetirse nuevamente más adelante.

Un factor de adherencia al cronograma (Factor P) cercano a 1 indica que las actividades se están ejecutando con cierta proximidad al plan, mientras que un factor de adherencia al cronograma menor a 1, indica una mala secuenciación en la ejecución de las actividades. El retrabajo está relacionado con el factor de adherencia al cronograma (Factor P) y el valor ganado (EV) de las actividades que no están en secuencia con el plan establecido. Parte del valor ganado (EV) que no está en secuencia implica un retrabajo para el cual es posible medir su costo para determinado periodo. Es posible cuantificar este retrabajo mediante fórmulas matemáticas. Igualmente, este método permite pronosticar el costo acumulado del retrabajo en forma análoga que la metodología de valor ganado (EV) (Lipke, 2012). No se profundizará en estos conceptos y sus aplicaciones, una vez que las estimaciones de costos no son el tema principal de esta investigación.

7. Hipótesis (Hi)

Los indicadores tradicionales de la metodología de valor ganado (EVM) y la metodología programación ganada (ESM) permiten estimar la proyección a término de los proyectos. Para determinar la fecha final del proyecto partiendo de una determinada fecha de estado, se utiliza el Estimado al Terminar (EAC_t), definido como la suma de la fecha real (AT) más el tiempo del trabajo remanente afectado por un factor de desempeño (PF), como se definió anteriormente en la metodología de programación ganada (ESM).

La propuesta de investigación, como desarrollo del presente trabajo, considera definir una hipótesis causal entre el Factor de Adherencia al Cronograma y las actividades que forman parte de la ruta crítica con la estimación de la fecha a término de los proyectos. De acuerdo con lo anterior, se ha determinado considerar tres factores de desempeño (PF) con el fin de buscar una mejora en la estimación a término de los proyectos. Para ello se definen los siguientes factores de desempeño (PF) y la correspondiente fórmula de estimación al terminar en tiempo:

7.1 Hipótesis #1 – Hi₁

El factor de desempeño, definido como el índice de desempeño en tiempo (SPI) de las actividades de la ruta crítica, mejora el estimado al terminar del proyecto en tiempo.

$$(Hi_1: X \longrightarrow Y)$$

7.1.1 Justificación

La ruta crítica identifica el conjunto de tareas que definen la máxima duración del proyecto, razón por la cual es importante mantener especial atención al desempeño con el cual se están ejecutando estas tareas. En caso de presentarse una desviación en el ritmo de ejecución de las tareas de la ruta crítica, habrá certeza de que nuestro proyecto se verá afectado en la misma proporción.

Para el caso de esta investigación se propone que, del mismo modo como la programación ganada (ES) aplica para todo el proyecto o para una sección de este (Lipke, 2006), el índice de desempeño en tiempo (SPI) puede aplicarse únicamente a la ruta crítica, de modo tal que el desempeño de ejecución sobre la ruta crítica afecta a la totalidad del proyecto.

7.1.2 Factor de Desempeño #1

El factor de desempeño #1 (PF₁) es el indicador de desempeño en tiempo, que considera el valor ganado (EV) y el valor planificado (PV) de las actividades que forman parte de la ruta crítica, en una determinada fecha de estado o de avance. En este caso, se supone que la suma del valor ganado (EV) de las actividades que forman parte de la ruta crítica es el valor ganado crítico o *Critical Earned Value* (EV_C); de esta misma forma se

supone que la suma del valor planificado (PV) de las actividades que forman parte de la ruta crítica es el valor planeado crítico o *Critical Planned Value* (PV_c). Se nombra índice de desempeño en tiempo crítico o *Critical Schedule Performance Index* (SPI_c) y se define matemáticamente como:

$$PF_1 = SPI_c = \frac{EV_c}{PV_c}$$

En donde:

EV_c : Es la suma del valor ganado de las actividades de la ruta crítica

PV_c : Es la suma del valor planificado de las actividades de la ruta crítica

7.1.3 Estimado al terminar en tiempo #1 (EAC_t #1):

De acuerdo con lo anterior, se propone entonces el Estimado al Terminar en Tiempo como:

$$EAC_t = AT + \frac{(PD-ES)}{SPI_c} \text{ donde } SPI_c = \frac{EV_c}{PV_c}$$

$$EV_c = \sum_i^n EV_i; \text{ } i \text{ actividad que hace parte de la ruta crítica}$$

$$PV_c = \sum_i^n PV_i; \text{ } i \text{ actividad que hace parte de la ruta crítica}$$

7.2 Hipótesis #2 – Hi_2

El factor de desempeño (PF) definido como el índice de desempeño en tiempo (SPI) de la metodología de gestión del valor ganado (EVM), multiplicado por el factor de adherencia al cronograma (Factor P), mejora el estimado al terminar del proyecto en tiempo.

$$(Hi_2: X \longrightarrow Y)$$

7.2.1 Justificación

El índice de desempeño en tiempo (SPI) se define como la relación entre el valor ganado (EV) y el valor planeado (PV), es decir (EV/PV). Si estos valores son iguales o muy

cercanos, producirán un indicador de desempeño cercano a 1, lo cual indica que el desempeño ha sido alto.

$$SPI = \frac{EV}{PV} \therefore \text{si } EV = PV \rightarrow SPI = 1$$

Para el caso particular en que el cronograma tiene tareas adelantadas que compensan las tareas atrasadas, el valor ganado (EV) podrá ser igual o al menos muy cercano al valor planeado (PV), dando como resultado un índice de desempeño en tiempo (SPI) cercano a 1. Esto indica que el desempeño del proyecto es bueno, sin embargo, el factor de adherencia al cronograma (Factor P) podría ser cercano a cero (0), lo que revela una ejecución de tareas poco cercana a las definidas en la línea base de cronograma.

Por tal razón, esta investigación propone que el índice de desempeño en tiempo (SPI) sea afectado por el factor de adherencia al cronograma (Factor P), el cual indica el grado de cercanía con el que se están ejecutando las tareas del cronograma con respecto a la línea base definida.

Así, se tendrá un factor de desempeño (PF) que incluye la eficiencia con la cual se están ejecutando las tareas, índice de desempeño en tiempo (SPI), y la cercanía con respecto a la línea base, factor de adherencia al cronograma (Factor P).

7.2.2 Factor de Desempeño #2

El factor de desempeño #2 (PF₂) considera afectar el tradicional índice de desempeño en tiempo (SPI) de la metodología de gestión de valor ganado (EVM), por el factor de adherencia al cronograma (Factor P) de todo el proyecto. Esto, teniendo en cuenta que la no adherencia al cronograma puede afectar la terminación del proyecto, al tener actividades atrasadas que formen parte de la ruta crítica. Matemáticamente, se expresa como se relaciona a continuación:

$$PF_2 = SPI * P$$

7.2.3 Estimado al terminar en tiempo #2 (EAC_t #2):

De acuerdo con lo anterior, se propone entonces el Estimado al Terminar en Tiempo (EAC_t) como:

$$EAC_t = AT + \frac{(PD - ES)}{SPI * P}$$

7.3 Hipótesis #3 – Hi₃

El factor de desempeño (PF₃), definido como el factor de adherencia al cronograma (Factor P), mejora el estimado al terminar del proyecto en tiempo.

$$(Hi_3: X \rightarrow Y)$$

7.3.1 Justificación

Un buen factor de adherencia al cronograma (Factor P) indica que las tareas se han ejecutado de la misma manera como fueron planeadas. El caso contrario, un factor de adherencia al cronograma (Factor P) que tendiente a cero (0), indica que las tareas no se han ejecutado de la misma manera como fueron planeadas, aumentando el riesgo de retrabajo y por lo tanto incrementando el tiempo de finalización del proyecto.

Se plantea entonces usar el factor de adherencia al cronograma (Factor P) como factor de desempeño (PF).

7.3.2 Factor de Desempeño #3

El Factor de Desempeño #3 (Pf₃) considera solamente el Factor de Adherencia al Cronograma (Factor P).

$$PF_3 = P$$

7.3.3 Estimado al terminar en tiempo #3 (EAC_t #3):

Según lo anterior, se propone el Estimado al Terminar en Tiempo (EAC_t) como:

$$EAC_t = AT + \frac{(PD - ES)}{P}$$

8. Metodología

A continuación, se describe la metodología que se seguirá para la presente investigación:

8.1 Revisión de literatura

Esta investigación requiere de la revisión de la literatura científica existente relacionada con la metodología de gestión valor ganado (EVM), la programación ganada (ES), el factor de adherencia al cronograma (Factor p) y las tareas de la ruta crítica.

La búsqueda de información se realizará utilizando las bases de datos disponibles, a través del acceso que provee la Escuela Colombiana de Ingeniería a los estudiantes de la Maestría en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos, y, para este caso particular, se limitará a los siguientes motores de búsqueda:

- Scopus
- ScienceDirect
- SpringerLink
- Google Academic

Utilizando la metodología de Revisión Sistemática de Literatura (Velásquez, 2015) se ha seleccionado, evaluado e interpretado la literatura científica encontrada (Kitchenham & Charters, 2007).

8.1.1 Justificación de la Revisión de Sistemática de Literatura

Esta revisión de literatura es requerida como parte del presente trabajo de investigación y tiene como fin ofrecer un contexto general sobre las teorías y trabajos de investigación que se han adelantado en el ámbito de la gerencia de proyectos, relacionadas con las metodologías de seguimiento y control que permiten estimar la fecha de finalización: gestión de valor ganado (EV), programación ganada (ES) y el factor de adherencia al cronograma (Factor P).

8.1.2 Formulación de las preguntas de la Revisión Sistemática de Literatura

A continuación, se presentan las preguntas de investigación definidas para la ejecución de la revisión de literatura planteada:

- Pregunta 1: ¿Cuáles son las metodologías existentes para la estimación de la fecha de finalización de los proyectos, que incluyen el factor de adherencia de los cronogramas?

- Pregunta 2: ¿Cuáles son las tendencias recientes en las metodologías para estimar la fecha de finalización de los proyectos, incluyendo como parte de esta el factor de adherencia de los cronogramas?

8.1.3 Diseño del protocolo de búsqueda

8.1.3.1 Criterios de inclusión

- Artículos científicos que estudien metodología de Gestión de Valor Ganado (EVM), Programación Ganada (ES), el Factor de Adherencia al Cronograma (Factor P) para realizar estimaciones de la fecha de finalización los proyectos.
- Artículos científicos publicados durante los últimos diez (10) años.
- Artículos publicados en un *Journal* reconocido a nivel mundial y que sea indexado y arbitrado.
- Sitios web específicos sobre las metodologías mencionadas.

8.1.3.2 Criterios de exclusión

- Artículos que tengan un tiempo de publicación mayor a 15 años.
- Artículos enfocados en la estimación a término de los proyectos que tomen como base únicamente el costo.

8.1.3.3 Evaluación de calidad

Se considera que un artículo científico es de calidad, si ha sido referenciado en cinco (5) investigaciones posteriores a su publicación.

8.1.4 Búsqueda de información

Para realizar la búsqueda de información, se han seleccionado un conjunto de palabras claves que se consideran relevantes para la investigación. Se ha verificado su aceptación internacional utilizando el tesauro de la UNESCO.

Los términos han sido definidos en idioma español e inglés únicamente, se han definido un conjunto de combinaciones de palabras y de relaciones entre ellas utilizando operadores boléanos (and, or, xor, not).

8.1.4.1 Palabras claves

Palabras Clave

• Valor	• Ganado
• Programación	• Adherencia
• Revisión	• Sistemática
• Literatura	• Ganada
• Gerencia	• Proyectos
• Ruta	• Crítica

Keywords

• Value	• Earned
• Schedule	• Adherence
• Review	• Systematic
• Project	• Management
• Path	• Critical

La palabra ‘**adherencia**’ se incluye dentro del listado de palabras claves a pesar de no encontrarse en el tesoro de la UNESCO, debido a que es un término ampliamente utilizado para hacer referencia Factor de Adherencia al Cronograma (Factor P), que se describe en el marco teórico y es fundamental para la consulta de información relacionada con el tema de investigación.

8.1.4.2 Combinaciones

Adicional a las palabras mencionadas anteriormente se podrán realizar combinaciones de palabras en inglés y español: A continuación, se mencionan algunas combinaciones:

Programación + ganada + factor + adherencia

Valor + ganado + factor + adherencia + gerencia + proyectos

Revisión + sistemática + literatura

Earned + schedule + critical + path

Earned + Value + critical + path

8.2 Validación de hipótesis

Batselier & Vanhoucke (2015a) crearon una base de datos de proyectos reales, que a la fecha de publicación contaba con 51 proyectos de diferentes sectores, con diferentes tiempos de duración que varían desde tres meses hasta más de 4 años y con presupuestos desde los € 100.000 hasta los € 500.000.

El objetivo de los autores mencionados fue la creación de una base de datos de proyectos diversos en tamaños y sectores económicos con información real para ser usada en múltiples estudios interesados en uno o varios aspectos de las dimensiones de la Programación Dinámica. Este concepto fue introducido por (Uyttewaal, 2005) y se basa en las tres dimensiones para la gerencia de proyectos: Programación de la Línea Base, Análisis de Riesgos y Control de Proyecto.

La base de datos de proyectos en mención ha sido utilizada en algunos estudios, por ejemplo en Batselier & Vanhoucke (2017), donde utilizan como método de estimación la Suavización Exponencial o *Exponential Smoothing* (XSM), para pronosticar la fecha de finalización de los proyectos y lo compara con otros métodos. También en Batselier & Vanhoucke (2015b) que presentan la comparación de diferentes métodos de pronóstico entre ellos programación ganada (ES) y duración ganada (ED), con diferentes factores de desempeño (PF).

La presente investigación está interesada en el tercer aspecto, Control de Proyecto, que, en el artículo de Batselier & Vanhoucke (2015a), usa la metodología de gestión de valor ganado (EVM) para conocer el estado de avance de los proyectos y pronosticar una fecha de finalización y presupuesto.

Entonces, la validación de las tres hipótesis propuestas (H_{i1} , H_{i2} y H_{i3}) será realizada con la información de la base de datos de proyectos reales creada por Batselier &

Vanhoucke (2015a) que incluye el cronograma de proyecto e información de seguimiento y control realizado en diferentes periodos de tiempo.

8.2.1 Selección de proyectos

Esta investigación usará la información de los 23 proyectos utilizados en los artículos de Batselier & Vanhoucke (2015b y 2017) y Batselier & Vanhoucke, (2015b), por considerar que ofrece un punto de comparación entre los métodos de pronóstico allí utilizados y los propuestos.

Cada proyecto cuenta con una tarjeta de proyecto, *Project Card*, que corresponde a un archivo PDF en el cual se describe el proyecto, se presenta la línea base, análisis de riesgos y la precisión de la estimación entre otros conceptos. Por medio de este archivo, se asegura que el proyecto es auténtico e indica qué partes fueron simuladas para completar información faltante. Adicionalmente, cada proyecto cuenta con un archivo Excel, con los detalles del cronograma, la información obtenida en los periodos de seguimiento, que incluye los indicadores necesarios para realizar estimaciones de la fecha de finalización e información adicional no relevante para esta investigación.

Imagen 1: Precisión de pronóstico simulado

2.3.1. Simulated forecasting accuracy

The accuracy of time and cost forecasting methods has been evaluated based on Monte Carlo simulation runs using the risk profiles described in section "2.2. Risk Analysis". Based on these risk profiles, the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and Mean Percentage Error (MPE) have been calculated to evaluate the expected accuracy of the time and cost predictions, EAC(t) and EAC, respectively.

Simulated EAC(t) accuracy			Simulated EAC accuracy		
method - PF	MAPE [%]	MPE [%]	method (PF)	MAPE [%]	MPE [%]
PV - 1	11.5	9.5	1	11.3	11.3
PV - SPI	17.5	1.2	CPI	5.8	-0.2
PV - SCI	25.0	-23.6	SPI	13.7	3.6
ED - 1	10.1	7.6	SPI(t)	9.9	4.6
ED - SPI	16.3	-0.3	SCI	14.3	-10.2
ED - SCI	20.3	-13.2	SCI(t)	11.7	-8.7
ES - 1	8.5	6.7	0.8 CPI + 0.2 SPI	5.6	1.3
ES - SPI(t)	10.4	-0.2	0.8 CPI + 0.2 SPI(t)	5.1	1.2
ES - SCI(t)	16.0	-12.8			

According to the MAPE values¹ the best performance for time forecasting can be expected from the unweighted Earned Schedule method. For cost forecasting the CPI-weighted method and the two methods using a composite performance factor should yield the best results.

Fuente: Archivo "C2011-07 Project card.pdf"

En la siguiente tabla se presentan los métodos de pronóstico utilizados en Batselier & Vanhoucke (2015b) y los factores de desempeño con los que se realizaron los cálculos de las estimaciones a término de los proyectos para luego ser comparadas.

Tabla 1: Métodos de Pronóstico vs Factor de Desempeño

Método de pronóstico	Factor de Desempeño		
	1	SPI	SCI
Planned Value (PV)	X	X	X
Earned Duration (ED)	X	X	X
Earned Schedule (ES)	X	X	X

Fuente: Los autores

Batselier & Vanhoucke (2015b) definieron en nueve el número óptimo de periodos de seguimiento: “si un proyecto contiene un total de nueve períodos de seguimiento, significa que los datos de tres períodos de seguimiento están disponibles para las tres etapas definidas como temprana, media y tardía para ese proyecto” (p.1594).

Etapa temprana o *early stage*: Etapa en la cual el porcentaje completado del proyecto se encuentra el 0% y el 30%.

Etapa media o *middle stage*: Etapa en la cual el porcentaje completado del proyecto se encuentra el 30% y el 70%.

Etapa tardía o *late stage*: Etapa en la cual el porcentaje completado del proyecto se encuentra el 70% y el 100%.

Sin embargo, para efectos de la presente investigación se considera que, si un proyecto presenta 6 o más periodos de seguimiento, será considerado como parte del grupo de proyectos con los cuales se realizará la evaluación de las hipótesis propuestas (Hi₁, Hi₂ y Hi₃). Por lo anterior, la base de datos empleada considera un total de 57 proyectos a ser evaluados. En el Anexo 1 se presenta el listado de los proyectos que se seleccionaron según los criterios descritos.

8.2.2 Precisión de la evaluación del pronóstico

Siguiendo el mismo método utilizado en Batselier & Vanhoucke (2015b) y Batselier & Vanhoucke (2017), se calculará la precisión de la estimación de las tres hipótesis propuestas (H_{i1} , H_{i2} y H_{i3}) en términos de MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A - P_t}{A} \right|$$

Donde A representa el valor real al final de proyecto y P_t el valor pronosticado en el periodo de tiempo t . Además, n corresponde al número de periodos en los cuales se tomó información de seguimiento y control para el proyecto.

8.2.3 Pronóstico de estimación de la fecha de terminación y cálculo del MAPE

Usando la información contenida en los archivos de Excel que acompañan a cada proyecto, se realizarán los cálculos de la fecha de terminación para los 57 proyectos seleccionados, según las hipótesis planteadas (H_{i1} , H_{i2} y H_{i3}). Estos cálculos serán realizados para cada periodo de seguimiento.

Una vez determinada la fecha de terminación del proyecto, se calculará el MAPE o *Mean Absolute Percentage Error* por cada proyecto por cada método de estimación planteado en las hipótesis (H_{i1} , H_{i2} y H_{i3}). Con esta información, se obtiene al final tres resultados de fechas de terminación, una por cada método de pronóstico propuesto y su respectivo porcentaje de precisión MAPE.

9. Resultados

9.1 Hallazgos de la Revisión Sistemática de Literatura

Como hallazgos relevantes de la revisión sistemática de literatura, se encuentran:

- No se encontraron métodos de pronóstico de la fecha de finalización de proyectos que incluyan el Factor P.

- Se encontró que los estudios realizados con respecto a los métodos de pronósticos están enfocados en realizar comparaciones entre los métodos existentes y algunas propuestas nuevas que no incluyen el Factor P.
- En el Anexo 2 se presenta el listado de los artículos encontrados como resultado de la búsqueda de documentos utilizando las palabras claves definidas para la revisión sistemática de literatura.

9.2 Análisis de resultados

En el Anexo 3 se presentan los resultados del cálculo del MAPE para cada método de estimación de la fecha de terminación y el indicador SP (*Serial / Parallel*) que representa la tipología de la red de cronograma. Las fechas estimadas de terminación fueron calculadas según los métodos PV, EV y ED (Anbari, 2003), utilizando para cada método de estimación los factores de desempeño igual a 1, SPI y SCI, definido éste último como el producto de SPI por CPI.

Entonces, utilizando la información de los proyectos del Anexo 3, se evidencia que el método ED presenta el menor valor del MAPE en 11 proyectos de los 56 analizados, (proyectos C2012-15, C2014-08, C2015-04, C2015-29, C2013-02, C2014-03, C2015-30, C2016-05, C2016-06, C2016-08 y C2016-09) de estos, 7 proyectos consideran el factor de desempeño igual a 1, otros 2 proyectos el factor de desempeño SPI y 2 proyectos el factor de desempeño SCI.

El método PV presenta el menor valor del MAPE en solo 2 de los 56 proyectos cuando considera el factor de desempeño (PF) igual a 1; (proyectos C2013-01 y C2015-16) mientras que las propuestas como hipótesis de la presente investigación (H_{i1} , H_{i2} y H_{i3}), presentan un MAPE inferior que los demás métodos en 7 proyectos de los 56 analizados, (proyectos C2013-12, C2013-04, C2013-10, C2013-11, C2013-16, C2015-01 y C2015-32) es decir, un 12.5% del total. De estos, 3 proyectos consideran un factor de desempeño igual al Factor P, 3 cuando el factor de desempeño es $SPI \times P$, y 1 solo cuando el factor de desempeño es SPI_C .

El proyecto C2013-12 presenta la mayor precisión en su fecha de terminación cuando se utiliza el método ES con un factor de desempeño igual a SPI_c (MAPE = 7.47%). En este mismo proyecto el factor de desempeño SPI x P presenta un MAPE igual a 11.11%, el cual es de mayor precisión que los métodos PV con factores de desempeño SPI y SCI respectivamente, (MAPE = 19.90% y 16.30%) al igual que el método ED con factor de desempeño igual a 1 (MAPE = 16.50%), y el método ES con factores de desempeño 1, SPI y SCI (MAPE = 15.10%, 18.70% y 22.50%).

En general, se observa que la mayor precisión para determinar la fecha de terminación de los proyectos se presenta con el método ES cuando el factor de desempeño es igual a 1 dado que es más preciso en el 50% de los proyectos analizados.

9.2.1 Hipótesis 1 (H_{1i}) – Factor de desempeño = SPI Crítico

Esta hipótesis plantea la creación de un nuevo factor de desempeño que está dado por el SPI Crítico (SPI_c). Se denomina crítico porque es un factor de desempeño calculado únicamente con las tareas de la ruta crítica, por lo tanto, fue necesario identificar cuales tareas de cada proyecto hacen parte de la ruta crítica y para ello se adquirió una licencia de software ProTrack, herramienta con la cual Batselier & Vanhoucke (2015b) realizaron los análisis de los métodos de estimación que compararon en dicho artículo y con el cual crearon los archivos de Excel con los datos de los proyectos utilizados en esta investigación.

El proyecto identificado como “C2015-35 Retirement Apartments” presentó errores al abrirlo utilizando ProTrack, por lo tanto, fue necesario descartarlo del listado de proyectos seleccionados.

Durante el proceso de revisión de la ruta crítica de los 56 proyectos utilizando ProTrack, se encontró que algunos proyectos presentan una ruta crítica atípica, por ejemplo, actividades críticas solamente en la etapa tardía del cronograma, solo en la etapa inicial o solo en el en la etapa media y, en otros casos, las actividades críticas de los proyectos se mostraban como hitos. De acuerdo con esta información, se procedió a clasificar los

proyectos en los cuales la ruta crítica se conforma por actividades que se distribuyen a lo largo del tiempo de toda la red del cronograma, es decir, actividades críticas que se encuentran en la etapa temprana, etapa media y etapa tardía del proyecto. Bajo esta consideración, en los proyectos que no tienen una ruta crítica ajustada a esta definición, el indicador propuesto SPI_C no se considera para estimar la fecha de terminación. Como resultado, 14 proyectos presentan una ruta crítica favorable (Anexo 4) y 42 proyectos una desfavorable.

De los resultados del grupo de proyectos con ruta crítica favorable (Anexo 4), se puede apreciar que en 8 de los 14 proyectos analizados (57%), el MAPE, en al menos uno de los métodos con los factores de desempeño SPI_C , $SPI \times P$ o Factor P es más preciso que el MAPE de alguno de los otros métodos para determinar la fecha de terminación cuando utilizan los factores de desempeño tradicionales (1, SPI o SCI). Por ejemplo, el proyecto C2014-05 tiene una mayor precisión cuando se utiliza el factor de desempeño $SPI \times P$ (MAPE = 8.65%), mientras que el método PV presenta un MAPE = 9.97%, cuando utiliza el factor de desempeño SPI. De forma similar, en el proyecto C2013-9 es más preciso utilizar el método ES con un factor de desempeño igual a SPI_C (MAPE = 16.39%), que emplear el método PV con factores de desempeño 1 o SPI (MAPE = 16.90% y 18.40% respectivamente).

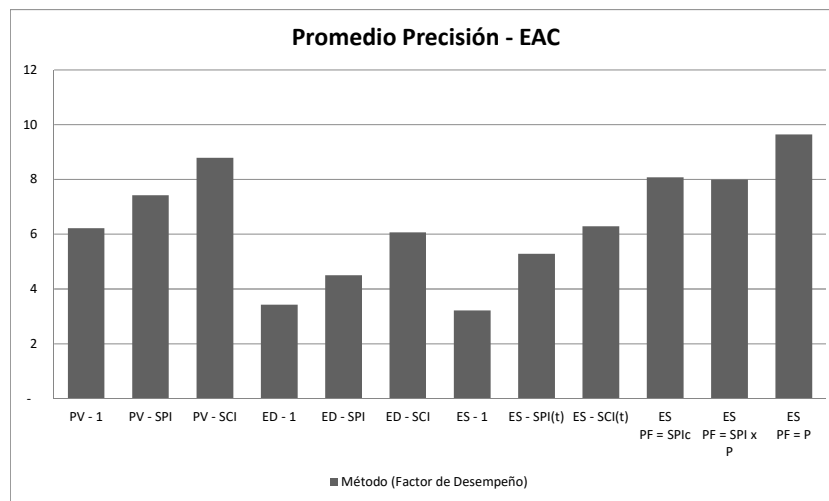
Otro ejemplo se puede observar en el proyecto C2015-06 cuando se compara los valores del MAPE obtenidos con el método ES utilizando los tres factores de desempeño propuestos: SPI_C , $SPI \times P$ y Factor P (MAPE = 10.85%, 9.22% y 14.47% respectivamente), con el valor del MAPE obtenido a través del método PV, utilizando el factor de desempeño SCI (MAPE = 27.46%).

En las Gráficas 1 y 2 se observa el promedio de la posición en que se encuentra cada método de estimación con su respectivo factor de desempeño. Para el primer grupo de proyectos, (ruta crítica favorable), el método ES es más preciso cuando utiliza un factor de desempeño igual a 1; seguido del método ED con el mismo factor. El método ES, con el factor de desempeño SPI_C , propuesta Hi_1 , es en promedio el octavo método más preciso, sin

embargo, presenta una mayor precisión cuando se compara con el método PV con el factor de desempeño SCI.

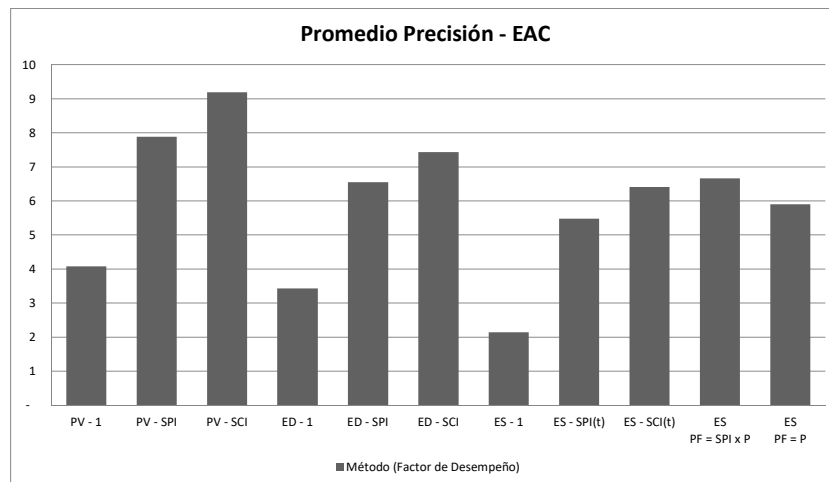
En el segundo grupo de proyectos (ver Gráfica 2) se puede observar que el método ES, con los factores de desempeño SPI x P y Factor P, en promedio ocupan la posición entre 6 y 7 de los 12 factores de desempeño comparados, sin embargo, son más precisos que los métodos PV y EDM, cuando utilizan los factores SPI y SCI, cuyos promedios son 8 y 9 respectivamente.

Gráfica 1: Promedio de precisión EAC (Proyectos con Ruta Crítica Favorable)



Fuente: Los autores

Gráfica 2: Promedio de precisión EAC (Proyectos con Ruta Crítica Desfavorable)



Fuente: Los autores

9.2.2 Hipótesis 2 (Hi₂) – Factor de desempeño = SPI x P

Esta hipótesis plantea que el factor de desempeño, para la estimación de la fecha de terminación de los proyectos, es el producto de SPI por el Factor P.

De acuerdo con los resultados obtenidos, Anexo 3, se encuentra que en 37 de los 56 proyectos (66%), al menos uno de los factores de desempeño propuestos (SPI x P o el Factor P) tiene una mayor precisión que los demás métodos que utilizan los factores de desempeño SPI o SCI. Por ejemplo, el proyecto C2011-7 tiene un MAPE del 14.49% cuando el factor de desempeño es igual al Factor P, mientras que, con el método ED, el MAPE es de 36.10% y 38.10%, cuando se emplean los factores de desempeño SPI y SCI, respectivamente.

Para el caso particular de la estimación de la fecha de finalización de los proyectos usando la hipótesis 2 (Hi₂), que usa el factor de desempeño SPI x P, se observa que tiene un menor MAPE en 14 proyectos (25%) de los 56 analizados, comparado con los métodos PV, ES y ED, utilizando como factor de desempeño SPI y SCI:

9.2.3 Hipótesis 3 (Hi₃) – Factor de desempeño = Factor P

Esta hipótesis plantea que el factor de desempeño, para la estimación de la fecha de terminación de los proyectos, es el el factor de adherencia al cronograma (Factor P).

En este caso, la estimación de la fecha de terminación de los proyectos usando la hipótesis 3 (Hi₃), que usa el factor de desempeño igual al Factor P, se observa que tiene un menor MAPE en 21 proyectos (37%) de los 56 analizados, comparado con los métodos PV, ES y ED, cuando utilizan los factores de desempeño SPI y SCI.

Adicionalmente, se encontró que, en 12 proyectos (21%) de los 56 analizados (C2015-34, C2015-01, C2013-16, C2014-05, C2015-30, C2013-02, C2015-02, C2013-03, C2013-05, C2011-13, C2016-08, y C2013-10), la precisión de la estimación de finalización del proyecto es mayor con el método ES utilizando el factor de desempeño igual a SPI x P y, al mismo tiempo, con el método ES utilizando el factor de desempeño igual al Factor P.

De este subconjunto de 12 proyectos, se encontró que el MAPE con el método ES utilizando el factor de desempeño igual al Factor P es menor que el MAPE con el método ES utilizando el factor de desempeño SPI x P. Esto se puede ver en 7 proyectos (C2015-34, C2013-16, C2013-02, C2015-02, C2013-03, C2011-13 y C2016-08).

10. Conclusiones y Recomendaciones

Determinar con mayor o menor precisión la fecha de terminación de un proyecto, se constituye tal vez como una de las acciones más impactantes en la ejecución de los proyectos, ya que el tiempo implica costos y esta dinámica se relaciona con el alcance. En esta investigación la estimación a término se abordó desde dos elementos considerados determinantes en el seguimiento al cronograma como lo son la ruta crítica y el factor de adherencia que el proyecto mantenga con la línea base del tiempo. Las propuestas planteadas para resolver el interrogante de esta investigación fueron tres hipótesis (H_{i1} , H_{i2} y H_{i3}) que incluyen el componente de la ruta crítica y la adherencia al cronograma logrando mejorar las estimaciones a término en algunos de los proyectos analizados.

El factor de adherencia al cronograma es un indicador que debe ser tenido en cuenta por los gerentes de proyecto durante el proceso de seguimiento y control en la ejecución de proyectos; cómo se puede observar en la base de datos de proyectos analizados, cuando éste es utilizado como factor de desempeño para estimar la fecha de terminación con el método ES, mejora la precisión que los métodos PV y ED, cuando utilizan factores de desempeño SPI y SCI. En 3 de los 56 proyectos analizados, es más preciso que el método ES cuando utiliza un factor de desempeño igual a 1. De esta forma, se verifica la premisa de que cuando no se ejecutan las actividades como se han planeado existe un riesgo inminente de terminar en una fecha más alejada de la establecida dentro de la línea base.

De acuerdo con la base de datos analizada, Anexo 3, el método programación ganada (ES) presenta la mayor precisión para estimar la fecha de terminación de los proyectos cuando se utiliza un factor de desempeño igual a 1, es decir, cuando se considera que las desviaciones que se han presentado a la fecha no se volverán a presentar. Sin embargo, otros factores de desempeño como SPI afectado por el Factor P (SPI x P) o el

mismo Factor P, tienen una mejor precisión que los métodos tradicionales de estimación que utilizan los factores de desempeño SPI o SCI.

Si bien, en la metodología de gestión de valor ganado (EV), el indicador SPI ha sido criticado por autores como (Corovic, 2007) por estar basado en variables de costo (EV y PV) y aun así es utilizado para estimar la fecha de terminación de los proyectos, se puede observar en los proyectos analizados, que si se combina con el factor de adherencia al cronograma, como en la hipótesis 2 (Hi₂) donde el factor de desempeño es igual al producto de SPI por el Factor P, la estimación con el método programación ganada (ES) tiene mayor precisión que los métodos valor planeado (PV) y duración ganada (ED), con factores de desempeño SPI y SCI. Esto se puede observar en los proyectos C2013-04, C2013-10 y C2015-01 en cuyos casos la mayor precisión se obtiene con este factor de desempeño. Esto reafirma entonces que el factor de adherencia al cronograma es un indicador que debe ser tenido en cuenta en el análisis de los proyectos durante la etapa de ejecución, ya que una ejecución de actividades alejada de la línea base puede tener desviaciones importantes en la finalización de los proyectos.

Por otro lado, dentro del grupo de proyectos analizados, tres proyectos presentan la mayor precisión para estimar la fecha de terminación cuando se utiliza el Factor P como factor de desempeño con el método de estimación de programación ganada (ES), (proyectos C2013-16, C2015-32 y C2013-11); los cuales tienen un indicador SP (*Serial/Parallel*) entre el 27% y 38%, indicando que la red del cronograma tiende a ser más paralela que en serie. Adicionalmente, el Factor P durante los periodos de seguimiento en todos los proyectos tuvo un valor mínimo del 84%; es decir, la ejecución del proyecto estuvo muy cercana a lo establecido en la línea base. Esta característica, para estos proyectos, puede validarse en trabajos futuros de investigación por medio de simulaciones en las cuales se tenga como variables un Factor P mayor a al 84% durante los periodos de seguimiento y redes de cronograma con indicadores SP menores al 40%; de esta forma se podría determinar cuál método y con qué factor de desempeño es el más preciso.

Al observar los proyectos con ruta crítica favorable, es decir, aquellos que tienen al menos una actividad crítica en cada tercio de duración del proyecto, se puede observar que, cuando las actividades críticas representan el 50% o más del total de actividades, el método programación ganada (ES) con el factor de desempeño SPI_C , mejora la precisión en la estimación comparado con otros métodos como el método valor planeado (PV) o duración ganada (ED) cuando utilizan los factores de desempeño tradicionales SPI y SCI (ver proyectos C2012-15, C2014-07 y C2015-34).

En los proyectos analizados se observa que cuando el indicador SPI es superior al 60% y el Factor P es superior al 85%, la precisión en la estimación de la fecha de terminación utilizando el método programación ganada (ES) con los factores de desempeño $SPI \times P$, y Factor P, se mejora con respecto a los métodos PV y ED cuando utilizan los factores de desempeño SPI y SCI, esto se podría validar en futuras investigaciones a través de simulaciones con este tipo de caracterización.

A pesar de que la base de datos está conformada por proyectos con información real, esta información no siempre permite obtener conclusiones importantes cuando se utilizan indicadores o variables relacionadas con la ruta crítica. La base de datos de proyectos OR-AS presenta la información de los cronogramas en archivos de Excel que al convertirlos en archivos de Microsoft Project 2016 se encontró que el diagrama de Gantt no coincidía exactamente con la información de la base de datos. Estas diferencias se deben a que, en la práctica, algunos proyectos definen los cronogramas considerando restricciones impuestas de manera manual y la duración no está determinada por las relaciones de precedencia de sus actividades. Futuras investigaciones pueden ser desarrolladas a través de simulaciones de proyectos teniendo en cuenta como variables el indicador SP (*Serial/Parallel*) y un factor de desempeño como el Factor P, para estimar la fecha de terminación de los proyectos; lo anterior, partiendo de la base que las actividades en paralelo o en serie suponen una relación de precedencia que direccionan la ejecución de los proyectos, etapa en la cual se mide la adherencia al cronograma.

11. Trabajo futuro

Esta investigación utilizó la base de datos de proyectos reales creada por Batselier y Vanhoucke (2015a) con el objetivo de verificar, con datos del mundo real, la mejora en la estimación de la fecha de finalización de los proyectos usando las tres hipótesis propuestas (Hi_1 , Hi_2 , Hi_3), sin embargo, las conclusiones aquí obtenidas se limitan al conjunto de proyectos utilizados para tal comprobación. Los autores de esta investigación consideran que el siguiente paso será el uso de información masiva de proyectos que permitan aplicar métodos estadísticos para conocer con mejor precisión el comportamiento de las estimaciones de fecha de finalización de los proyectos usando las hipótesis planteadas y en lo posible que estas conclusiones pudieran ser generalizadas por tipo de proyectos.

A modo de ejemplo, en el libro Programación Ganada de Walter Lipke (2016), en el capítulo 3, “Verificación de la teoría” refieren que Mario Vanhoucke y Stephan Vandervoorde publicaron en el año 2007 un artículo con el nombre “*A simulation a evaluation of Earned Value Metrics to Forecast the Project Duration*” en el cual presentaron una conjunto de redes de cronograma generadas por computador, variando las relaciones de precedencia y generando de forma aleatoria, utilizando el método de simulación de Monte Carlo, las duraciones y costos de las actividades de un conjunto específico de escenarios de desempeño. Al final, lograron generar datos equivalentes a más de 25 millones de cronogramas y con estos datos estudiaron la capacidad de predicción de lo método de valor ganado (EV) y programación ganada (ES).

En el presente trabajo de investigación se planteó utilizar el factor de adherencia al cronograma o factor P como un factor de desempeño para determinar la fecha de terminación de los proyectos a través del método de programación ganada (ES); sin embargo a pesar de que la variable de costo no fue tomada en cuenta dentro de esta investigación, futuros trabajos o nuevas líneas de investigación podrían estudiar la variable costo dentro de los análisis y poder determinar si es posible encontrar una “adherencia al costo” de forma análoga a la adherencia al cronograma.

La información de los proyectos utilizados en los artículos de Batselier & Vanhoucke (2015b y 2017) y Batselier & Vanhoucke, (2015b), contiene un indicador de la

tipología de la red de cronograma denominado Serial / Parallel, el cual indica que tan en serie o en paralelo es esta red, un valor cercano a 0 significa una red de cronograma en paralelo y un valor cercano a 1 significa una red de cronograma en serie. Esta variable puede ser utilizada en trabajos complementarios a esta investigación a través de simulaciones de proyectos para encontrar alguna relación con las propuestas presentadas como hipótesis en el presente trabajo y validar la precisión de los métodos para estimar la fecha de terminación de los proyectos.

Adicional a lo anterior, nuevas variables podrían considerarse mediante simulaciones con el fin de tener una correlación y caracterización de los proyectos con los métodos de estimación de la fecha de terminación, por ejemplo, los autores de esta investigación proponen crear un **Factor de Elasticidad de las Actividades** definido como la capacidad que tiene las actividades de incorporar recursos con el objetivo de reducir su duración y por ende la duración total del proyecto. Si estas actividades formaran parte de la ruta crítica, podría relacionarse con el factor de desempeño SPI Crítico (SPI_C), propuesto como hipótesis (H₁), para mejorar la estimación de la fecha de terminación de los proyectos.

12. Referencias

- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2015a). Construction and evaluation framework for a real-life project database. *International Journal of Project Management*, 33(3), 697–710. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.09.004>
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2015b). Evaluation of deterministic state-of-the-art forecasting approaches for project duration based on earned value management. *Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2015). Evaluation of Deterministic State-of-the-Art Forecasting Approaches for Project Duration Based on Earned Value Management. International Journal of Project Management*, 33(7), 1588–1596. <https://doi.org/10.1016/j.ijpr.2015.04.003>
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2017). Improving project forecast accuracy by integrating earned value management with exponential smoothing and reference class forecasting.

- International Journal of Project Management*, 35(1), 28–43.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.10.003>
- Corovic, R. (2007). Why EVM is not good for schedule performance analyses (and how it could be...). *The Measurable News*, 2007(1), 22-25,27,29-30. Retrieved from <http://www.earnedschedule.com/Docs/Why EVM is not Good for Schedule Performance Analyses - Corovic.pdf>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature reviews in Software Engineering Version 2.3. *Engineering*, 45(4ve), 1051.
<https://doi.org/10.1145/1134285.1134500>
- Lipke, W. (2012). Schedule adherence and rework. *CrossTalk*, 25(6), 4–8. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84875153241&partnerID=40&md5=a32ff78943b6eb7e09b105186148bb71>
- Lipke, W. H. (2003). Schedule Is Different.
- Lipke, W. H. (2006). Applying earned schedule to critical path analysis and more. *The Measurable News*, 2006, 26–30. Retrieved from <http://www.earnedschedule.com/Docs/Applying ES to Critical Path and More.pdf>
- Lipke, W. H. (2008). Schedule adherence: A useful measure for project management,. *Projects and Profits*, 2009(June), 27–35. Retrieved from <http://www.pmi-cpm.org/members/library/Lipke2009Issue3.pdf>
- Vanhoucke, M. (2013). Measuring schedule adherence. *The Measurable News*, 4, 21–26.
- Velásquez, J. D. (2015). Una Guía Corta para Escribir Revisiones Sistemáticas de Literatura Parte 1. *Dyna*, 82(189), 9–12. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.48931>

13. Anexos

13.1 Proyectos seleccionados

Anexo 1

#	Proyecto
1	C2012-15 The Master Project
2	C2015-27 Railway Station Antwerp
3	(23) C2013-12 Young Cattle Barn
4	C2015-34 Roadworks Poperinge
5	(23) C2014-03 Organizational Development
6	(23) C2012-13 Pumping Station Jabbeke
7	C2015-01 Young Cattle Barn (2)
8	C2012-17 Building a Dream
9	(23) C2013-01 Wiedauwkaai Fenders
10	C2015-04 Apartment Building (5)
11	(23) C2013-17 Office Finishing Works (5)
12	(23) C2013-07 Family Residence
13	(23) C2013-15 Office Finishing Works (3)
14	C2015-08 Garden Center
15	C2016-05 Railway Bridge (5)
16	C2016-09 Data Loss Prevention System
17	(23) C2013-16 Office Finishing Works (4)
18	C2016-03 Railway Bridge (3)
19	(23) C2013-08 Timber House
20	C2016-07 Shopping Village Walkways
21	C2016-01 Railway Bridge (1)
22	C2014-05 Apartment Building (1)
23	(23) C2014-03 Organizational Development
24	C2016-02 Railway Bridge (2)
25	C2014-08 Apartment Building (4)
26	C2015-34 Roadworks Poperinge
27	(23) C2013-13 Office Finishing Works (1)
28	C2015-30 Social Apartments Ypres (1)
29	C2016-04 Railway Bridge (4)

30	C2016-06 Defense Building
31	C2015-03 Industrial Complex (1)
32	C2015-06 Family Residence (2)
33	C2015-16 Generic Document Output System
34	C2015-31 Social Apartments Ypres (2)
35	C2015-29 Fire Station
36	(23) C2013-09 Urban Development Project
37	C2015-07 Industrial Complex (2)
38	(23) C2013-04 Kitchen Tower Anderlecht
39	(23) C2013-06 Government Office Building
40	C2014-07 Apartment Building (3)
41	C2015-09 Railway Station (2)
42	C2015-32 Social Apartments Ypres (3)
43	(23) C2013-11 Recreation Complex
44	C2016-10 Biofuel Refinery
45	(23) C2011-07 Patient Transport System
46	(23) C2013-02 Sewage Plant Hove
47	C2015-02 Railway Station (1)
48	(23) C2013-03 Brussels Finance Tower
49	(23) C2011-12 Claeys-Verhelst Premises
50	(23) C2014-01 Mixed-use Building
51	(23) C2013-05 PET Packaging
52	C2014-04 Compressor Station Zelzate
53	(23) C2011-13 Wind Farm
54	C2014-06 Apartment Building (2)
55	C2016-08 SCM System
56	(23) C2013-10 Town Square

Fuente: Los autores

13.2 Artículos encontrados en la RSL

Anexo 2

Nombre	Autor	Año
Measuring the efficiency of project control using fictitious and empirical project data	Vanhoucke, Mario	2012
The To Complete Performance Index: An expanded view	Lipke, Walter H	2009
Impact of sensitivity information on the prediction of project's duration using earned schedule method	Elshaer, Raafat	2013

Construction and evaluation framework for a real-life project database	Batselier, Jordy, Vanhoucke, Mario	2015
A critical look at critical chain project management	Raz, Tzvi, Barnes, Robert, Dvir, Dov	2004
Futher Developments in Earned Schedule	Henderson, Kym	2004
Evaluation of deterministic state-of-the-art forecasting approaches for project duration based on earned value management	Batselier, Jordy Vanhoucke, Mario	2015
EDM: Earned Duration Management, a new approach to schedule performance management and measurement	Khamooshi, Homayoun Golafshani, Hamed	2014
Improving project forecast accuracy by integrating earned value management with exponential smoothing and reference class forecasting	Batselier, Jordy Vanhoucke, Mario	2017
A comparison of the performance of various project control methods using earned value management systems	Colin, Jeroen Vanhoucke, Mario	2015
How Many Types of Critical Activities Exist? A Conjecture in Need of Proof	Hajdu, M., Skibniewski, M. J. Vanhoucke, M., Horvath, A. Brilakis, I.	2016
Schedule adherence and rework	Lipke, Walter H	2012
An overview of recent research results and future research avenues using simulation studies in project management	Vanhoucke, Mario	2013
Earned duration management for a student association project	Vanhoucke, Mario Boelens, Annelien D'hondt, Hendrik Hoornaert, Eline Mareels, Evelyn Martens, Jens Servranckx, Tom	2017
A Comparison of Earned Value Management and Earned Schedule as Schedule Predictors on DOD ACAT 1 Programs	Crumrine, Ckt Ritschel, J	2013
Earned Schedule - Ten Years After	Lipke, Walter H	2014
Forecasting a Project's Duration under Various Topological Structures	Vanhoucke, Mario Vandevoorde, Stephan	2009
Applying Statistical Forecasting of Project Duration To Earned Schedule-Longest Path	Lipke, Walter H	2015
Measuring schedule adherence	Vanhoucke, Mario	2013
Earned schedule: A breakthrough extension to Earned value theory?- A Retrospective Analysis of real project data	Henderson, Kym	2003
A comparison of different project duration forecasting methods using earned value metrics	Vandevoorde, Stephan Vanhoucke, Mario	2006
Measuring the Accuracy of Earned Value /Earned Schedule Forecasting Predictors	Vanhoucke, Mario	2010

Applying earned schedule to critical path analysis and more	Lipke, Walter H	2006
A Simulation and Evaluation of earned value metrics to forecast the project duration	Vanhoucke, M Vandevoorde, S	2007
Forecasting Schedule Variance Using Earned Schedule	Lipke, Walter H	2017
Schedule adherence: A useful measure for project management,	Lipke, Walter H	2008
Why EVM is not good for schedule performance analyses (and how it could be...)	Corovic, Radenko	2007
Schedule Is Different	Schedule Is Different	2003

Fuente: Los autores

13.3 Tabla de resultados general

Anexo 3

#	Proyecto	Métodos de estimación existentes										Métodos de estimación propuestos		
		Network Topology Serial / Parallel SP	PV - 1	PV - SPI	PV - SCI	ED - 1	ED - SPI	ED - SCI	ES - 1	ES - SPI(t)	ES - SCI(t)	Hi1 = ES PF = SPIc	Hi2 = ES PF = SPI x P	Hi3 = ES PF = P
1	(23) C2013 - 09	17%	16.90%	18.40%	13.00%	13.10%	14.60%	12.90%	13.10%	13.90%	12.50%	16.39%	26.33%	25.64%
2	(23) C2013 - 12	23%	30.10%	19.90%	16.30%	16.50%	9.50%	8.60%	15.10%	18.70%	22.50%	7.47%	11.11%	25.56%
3	(23) C2014 - 02	64%	9.40%	9.70%	9.70%	8.20%	8.60%	8.50%	8.50%	7.80%	7.80%	16.11%	16.58%	18.85%
4	C2012 - 15	91%	6.00%	6.50%	6.90%	5.60%	5.70%	6.30%	6.90%	10.70%	10.90%	12.24%	14.69%	13.47%
5	C2014 - 05	81%	9.18%	19.93%	40.15%	6.15%	17.35%	32.37%	4.74%	10.86%	24.42%	8.65%	9.97%	15.58%
6	C2014 - 06	64%	5.81%	11.50%	13.39%	4.23%	10.56%	11.78%	2.29%	6.58%	8.98%	11.80%	10.99%	13.12%
7	C2014 - 07	57%	7.14%	20.19%	40.77%	4.60%	18.14%	32.66%	4.40%	13.63%	27.39%	9.39%	9.78%	14.75%
8	C2014 - 08	65%	9.45%	7.33%	17.57%	6.52%	5.57%	10.83%	8.64%	6.94%	6.01%	12.50%	13.65%	18.91%
9	C2015 - 04	48%	17.62%	17.03%	18.08%	13.20%	12.50%	12.79%	12.91%	20.35%	21.05%	24.94%	20.12%	21.10%
10	C2015 - 06	27%	7.80%	9.56%	27.46%	7.56%	8.17%	16.24%	6.24%	6.64%	16.61%	10.85%	9.22%	14.47%
11	C2015 - 29	36%	4.09%	4.09%	3.69%	3.58%	3.58%	3.50%	3.65%	3.76%	3.65%	15.52%	15.38%	15.38%
12	C2015 - 34	40%	31.69%	87.03%	88.90%	22.27%	75.63%	76.11%	17.41%	98.74%	106.00%	51.44%	73.65%	24.19%
13	C2016 - 10	25%	4.61%	4.60%	4.45%	4.41%	4.37%	4.37%	3.82%	3.50%	3.50%	16.30%	16.30%	16.30%
14	C2012 - 17	14%	19.58%	14.86%	28.65%	16.85%	14.72%	22.72%	15.55%	5.56%	11.80%	38.35%	16.37%	24.49%
15	(23) C2011 - 07	77%	9.00%	37.30%	38.80%	8.90%	36.10%	38.10%	8.00%	20.00%	20.80%	10.78%	24.89%	14.49%
16	(23) C2011 - 12	10%	6.64%	39.92%	45.93%	9.25%	39.34%	44.25%	3.08%	7.38%	9.33%	7.54%	17.32%	7.52%
17	(23) C2011 - 13	33%	10.24%	44.55%	70.96%	11.27%	43.72%	59.70%	8.41%	32.37%	35.61%	10.74%	19.09%	14.84%

18	(23) C2012 - 13	16%	9.00%	10.50%	9.60%	8.50%	10.00%	9.70%	7.70%	10.20%	10.30%	10.51%	17.96%	16.61%
19	(23) C2013 - 01	29%	1.30%	9.30%	24.70%	1.60%	9.30%	13.70%	1.70%	13.30%	17.20%	12.50%	12.28%	6.25%
20	(23) C2013 - 02	95%	6.10%	20.10%	18.20%	3.70%	20.10%	16.40%	5.40%	21.20%	17.30%	10.93%	14.65%	6.70%
21	(23) C2013 - 03	51%	4.90%	12.50%	13.80%	5.40%	12.50%	12.80%	4.30%	8.90%	9.20%	25.05%	8.33%	6.52%
22	(23) C2013 - 04	58%	14.90%	22.70%	22.60%	7.70%	14.70%	17.80%	5.70%	12.40%	16.90%	10.98%	5.26%	13.16%
23	(23) C2013 - 05	9%	11.30%	27.20%	27.20%	10.30%	24.30%	24.30%	5.80%	44.90%	44.90%	24.69%	12.32%	15.02%
24	(23) C2013 - 06	63%	3.40%	8.40%	14.80%	3.60%	8.40%	11.20%	2.70%	7.80%	10.60%	1.52%	13.87%	16.02%
25	(23) C2013 - 07	44%	5.90%	37.50%	37.10%	4.50%	38.10%	35.80%	3.80%	9.60%	8.40%	12.77%	33.00%	22.41%
26	(23) C2013 - 08	7%	6.80%	7.70%	8.60%	5.30%	6.50%	6.70%	4.90%	5.40%	5.30%	8.09%	11.59%	12.18%
27	(23) C2013 - 10	20%	10.70%	20.30%	38.00%	13.80%	20.30%	7.80%	3.40%	4.00%	6.40%	2.32%	3.13%	3.74%
28	(23) C2013 - 11	25%	9.40%	12.50%	12.10%	9.20%	12.50%	12.10%	10.40%	10.10%	9.50%	11.84%	11.67%	8.97%
29	(23) C2013 - 13	64%	8.80%	23.80%	25.00%	16.70%	23.80%	22.70%	5.60%	17.20%	18.40%	7.78%	26.52%	12.80%
30	(23) C2013 - 15	14%	26.80%	52.70%	53.30%	57.40%	52.70%	52.30%	17.80%	25.60%	18.30%	35.42%	38.61%	32.36%
31	(23) C2013 - 16	16%	53.40%	56.00%	44.60%	51.80%	56.00%	53.40%	34.40%	36.60%	30.20%	33.13%	22.44%	19.24%
32	(23) C2013 - 17	18%	15.50%	66.00%	104.10%	17.00%	66.00%	96.20%	14.80%	45.80%	69.60%	19.70%	93.64%	29.24%
33	(23) C2014 - 01	10%	7.80%	11.50%	18.20%	8.50%	11.50%	14.80%	6.30%	8.40%	11.60%	13.07%	16.70%	15.59%
34	(23) C2014 - 03	32%	7.10%	18.70%	124.70%	5.20%	18.00%	72.80%	6.70%	16.10%	69.20%	10.09%	16.39%	9.73%
35	C2014 - 04	48%	32.81%	24.79%	23.56%	26.67%	18.39%	18.25%	26.35%	17.80%	17.62%	28.82%	26.24%	33.66%
36	C2015 - 01	34%	22.54%	26.93%	41.90%	10.74%	18.89%	30.26%	11.96%	22.33%	34.60%	25.56%	6.88%	18.68%
37	C2015 - 02	27%	17.05%	61.37%	108.94%	12.86%	60.32%	94.41%	12.18%	57.11%	90.11%	190.71%	42.27%	12.33%
38	C2015 - 03	47%	6.04%	43.41%	46.56%	5.60%	42.65%	35.37%	4.28%	7.99%	12.27%	10.23%	28.90%	14.43%
39	C2015 - 07	10%	13.52%	17.84%	14.35%	11.33%	15.40%	11.11%	10.80%	14.88%	10.49%	14.60%	18.61%	17.72%
40	C2015 - 08	58%	3.38%	4.44%	4.19%	3.13%	3.88%	3.88%	2.56%	5.69%	6.19%	4.63%	10.25%	9.69%
41	C2015 - 09	4%	23.04%	44.62%	62.51%	13.82%	42.51%	57.66%	15.63%	10.94%	23.06%	33.68%	24.19%	21.31%
42	C2015 - 16	38%	14.70%	152.03%	239.36%	25.40%	152.03%	232.78%	18.33%	6901.35%	11161.19%	0.37%	197.17%	34.07%
43	C2015 - 24	27%	11.37%	38.98%	22.89%	13.23%	38.98%	24.18%	9.16%	23.61%	18.53%	0.00%	31.04%	10.30%
44	C2015 - 27	18%	11.99%	11.79%	37.80%	8.54%	8.13%	30.28%	7.11%	18.09%	44.92%	13.21%	8.74%	15.85%

45	C2015 - 30	70%	4.39%	14.99%	17.24%	3.66%	14.71%	16.68%	6.05%	25.70%	27.95%	3.49%	5.93%	12.40%
46	C2015 - 31	12%	16.67%	33.81%	33.42%	14.34%	32.91%	32.49%	14.22%	20.69%	20.12%	30.51%	25.71%	23.10%
47	C2015 - 32	8%	22.01%	22.69%	23.74%	27.26%	22.69%	24.29%	19.88%	10.79%	13.92%	31.62%	19.28%	7.83%
48	C2016 - 01	3%	14.11%	17.41%	22.37%	11.04%	14.26%	18.38%	9.95%	13.19%	17.98%	38.86%	13.86%	20.44%
49	C2016 - 02	41%	6.23%	7.11%	7.57%	5.71%	6.26%	6.62%	4.95%	9.68%	9.83%	8.76%	15.81%	18.59%
50	C2016 - 03	50%	8.70%	8.46%	8.89%	8.62%	7.32%	7.28%	5.86%	8.34%	8.26%	36.99%	14.60%	16.65%
51	C2016 - 04	14%	3.17%	3.44%	3.44%	2.97%	3.31%	3.31%	2.77%	4.28%	4.28%	3.95%	15.08%	15.25%
52	C2016 - 05	95%	0.38%	0.38%	0.38%	0.34%	0.34%	0.34%	0.35%	0.34%	0.34%	0.48%	0.88%	0.88%
53	C2016 - 06	27%	9.79%	273.76%	273.73%	6.31%	273.23%	273.21%	6.80%	75.59%	75.59%	6.72%	197.99%	17.01%
54	C2016 - 07	57%	24.17%	27.66%	27.66%	18.30%	20.91%	20.91%	16.00%	15.23%	15.23%	32.07%	15.77%	21.90%
55	C2016 - 08	49%	7.54%	32.39%	73.21%	4.96%	32.33%	59.65%	8.55%	43.50%	74.47%	2.16%	19.31%	7.63%
56	C2016 - 09	18%	3.95%	16.27%	139.12%	3.09%	16.27%	55.15%	5.15%	23.08%	56.30%	0.52%	39.00%	18.50%

Fuente: Los autores

13.4 Proyectos con Ruta Crítica Favorable

Anexo 4

#	Proyecto	Métodos de estimación existentes									Métodos de estimación propuestos		
		PV - 1	PV - SPI	PV - SCI	ED - 1	ED - SPI	ED - SCI	ES - 1	ES - SPI(t)	ES - SCI(t)	Hi ₁ = ES PF = SPIc	Hi ₂ = ES PF = SPI x P	Hi ₁ = ES PF = P
1	(23) C2013 - 09	16.90%	18.40%	13.00%	13.10%	14.60%	12.90%	13.10%	13.90%	12.50%	16.39%	26.33%	25.64%
2	(23) C2013 - 12	30.10%	19.90%	16.30%	16.50%	9.50%	8.60%	15.10%	18.70%	22.50%	7.47%	11.11%	25.56%
3	(23) C2014 - 02	9.40%	9.70%	9.70%	8.20%	8.60%	8.50%	8.50%	7.80%	7.80%	16.11%	16.58%	18.85%
4	C2012 - 15	6.00%	6.50%	6.90%	5.60%	5.70%	6.30%	6.90%	10.70%	10.90%	12.24%	14.69%	13.47%
5	C2014 - 05	9.18%	19.93%	40.15%	6.15%	17.35%	32.37%	4.74%	10.86%	24.42%	8.65%	9.97%	15.58%
6	C2014 - 06	5.81%	11.50%	13.39%	4.23%	10.56%	11.78%	2.29%	6.58%	8.98%	11.80%	10.99%	13.12%
7	C2014 - 07	7.14%	20.19%	40.77%	4.60%	18.14%	32.66%	4.40%	13.63%	27.39%	9.39%	9.78%	14.75%
8	C2014 - 08	9.45%	7.33%	17.57%	6.52%	5.57%	10.83%	8.64%	6.94%	6.01%	12.50%	13.65%	18.91%
9	C2015 - 04	17.62%	17.03%	18.08%	13.20%	12.50%	12.79%	12.91%	20.35%	21.05%	24.94%	20.12%	21.10%
10	C2015 - 06	7.80%	9.56%	27.46%	7.56%	8.17%	16.24%	6.24%	6.64%	16.61%	10.85%	9.22%	14.47%
11	C2015 - 29	4.09%	4.09%	3.69%	3.58%	3.58%	3.50%	3.65%	3.76%	3.65%	15.52%	15.38%	15.38%
12	C2015 - 34	31.69%	87.03%	88.90%	22.27%	75.63%	76.11%	17.41%	98.74%	106.00%	51.44%	73.65%	24.19%
13	C2012 - 17	19.58%	14.86%	28.65%	16.85%	14.72%	22.72%	15.55%	5.56%	11.80%	38.35%	16.37%	24.49%
14	C2016 - 10	4.61%	4.60%	4.45%	4.41%	4.37%	4.37%	3.82%	3.50%	3.50%	16.30%	16.30%	16.30%

Fuente: Los autores.