

Project Tightness (PT): una métrica concisa de tensión del cronograma

Fernando Acebes¹ * [0000-0002-4525-2610], Javier Pajares¹ [0000-0002-4748-2946]

¹ GIR INSISOC – Universidad de Valladolid, Paseo Prado de la Magdalena, s/n Valladolid, España

fernando.acebes@uva.es, javier.pajares@uva.es

Resumen

En este trabajo presentamos *Project Tightness* (PT), un nuevo indicador topológico destinado a evaluar la tensión estructural de los cronogramas de proyectos. El indicador combina información sobre la estructura de la red del proyecto y la duración de las actividades, ofreciendo una medida normalizada en el rango $[0,1]$. PT cuantifica el grado de compresión o “tensión” del cronograma integrando tanto las holguras de las actividades como la configuración de la estructura crítica del proyecto. A diferencia del indicador clásico XSLACK-R (holgura media relativa por actividad), propuesto por Patterson en *Project Scheduling: The Effects of Problem Structure on Heuristic Performance* (1976), el nuevo indicador normaliza la holgura total en función del número de actividades no pertenecientes al camino crítico dominante. De este modo, PT penaliza la presencia de ramas críticas paralelas —es decir, actividades críticas situadas fuera del camino crítico con mayor extensión—, un aspecto que XSLACK-R no distingue. El artículo desarrolla formalmente la definición y propiedades fundamentales del indicador (acotación, invariancia temporal y monotonidad) y presenta diversos ejemplos ilustrativos que facilitan su interpretación y aplicación práctica.

1. Motivación

En la literatura reciente sobre planificación y control de proyectos, los indicadores topológicos han demostrado ser determinantes para explicar el rendimiento de métodos y métricas (J. Song et al., 2025, 2026; Y. Song & Vanhoucke, 2025; Ünsal Altuncan y Vanhoucke, 2025; Vanhoucke, 2010, 2011; Vaseghi et al., 2024). Entre ellos, el índice serie-paralelo (I2 o SP) (L. V. Tavares, 1999; L. V Tavares et al., 2002; Vanhoucke et al., 2004, 2008) se ha utilizado de forma reiterada como variable moderadora clave. Los estudios citados comparan enfoques y extraen conclusiones distintas según el grado de paralelismo de la red. Los resultados obtenidos confirman el papel del indicador SP como un indicador estructural de referencia dentro del análisis de redes de proyecto.

No obstante, nuestra experiencia empírica sugiere que el indicador SP no es un indicador absoluto. En particular, los resultados también dependen de la “tensión” del cronograma, entendida como la proximidad en duración de los caminos que conforman el proyecto. Cuando varios caminos compiten por la criticidad (duraciones similares), la red puede volverse frágil ante pequeñas perturbaciones aun manteniendo el mismo valor de I2. Esta dinámica —ya observada en nuestros estudios sobre correlación entre actividades, donde la variación de I2 no explicaba ciertos patrones de desempeño tanto como cabría esperar, mientras que una medida explícita de tensión sí los capturaba mejor— podría extrapolarse a otros ámbitos de análisis en los que no se ha considerado este indicador.

En este contexto proponemos el indicador *Project Tightness* (PT). Existe un antecedente cercano, XSLACK-R (Kosztván et al., 2023; Kosztván y Novák, 2024; Patterson, 1976), que resume la holgura media relativa del proyecto; sin embargo, no distingue si la criticidad se ramifica en varias ramas paralelas. Dos proyectos pueden compartir la misma holgura media y, sin embargo, exhibir resiliencias muy diferentes ante retrasos locales si la holgura

está distribuida de forma desigual o si proliferan ramas críticas fuera del esqueleto dominante.

Project Tightness (PT) aborda esta limitación mediante una medida de tensión que combina: (i) cuánta holgura existe en el proyecto y (ii) cómo se estructura esa holgura respecto al camino crítico con mayor número de actividades. Con ello, PT detecta cuándo la criticidad se ramifica en paralelo y cómo se reparte la holgura (si está concentrada en pocas actividades o distribuida), ofreciendo una medida más útil para revisar resultados previos (p. ej., en correlación de actividades o en la comparación de métodos de control) y para orientar decisiones prácticas de planificación y seguimiento.

2. Definición

Sea un proyecto con:

- n : nº total de actividades (excluyendo actividades ficticias de duración 0).
- TPT : duración planificada del proyecto.
- TF_i : holgura total (*Total Float*) de la actividad $i = 1, \dots, n$.
- \mathcal{P}_c : conjunto de caminos críticos (duración del camino crítico = TPT).
- $r = \max_{P \in \mathcal{P}_c} |P|$: nº de actividades del camino crítico con mayor número de actividades (dentro de todos los posibles caminos críticos).

Definimos **Project Tightness** (PT), ratio de holgura media (en términos relativos) por cada actividad que no pertenece al camino crítico “más largo”, como:

$$PT = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n TF_i}{(n - r) TPT}$$

Interpretación:

- Numerador: toda la holgura total del proyecto (suma de TF_i).
- Denominador: representa la “capacidad” disponible para alojar la holgura: el número de actividades *no-r* ($n - r$) multiplicado por la escala temporal del proyecto TPT .
- Resultado: holgura relativa media disponible por actividad fuera del camino crítico dominante.

Cuanto más alto $PT \Rightarrow$ más tensión (menos margen de tiempo por actividad fuera del camino crítico principal).

Si aparecen ramas críticas paralelas (más actividades con $TF = 0$ fuera del camino r -máximo), $(n - r)$ aumenta, pero el numerador no (esas actividades no aportan holgura). Entonces PT aumenta \Rightarrow señal de mayor tensión.

Nota práctica:

En *Critical Path Method* (CPM) “puro”, la holgura total de una actividad TF_i no debería superar la duración del proyecto TPT . Pero a veces, por cómo se modela/importa la red (actividades ficticias, dependencias redundantes, errores), aparecen valores atípicos: $TF_i > TPT$. Al sumar $\sum TF_i$ sin ajustes, el numerador del cociente queda sobredimensionado y el indicador deja de reflejar fielmente la tensión.

Para solucionarlo, se normaliza y recorta cada holgura:

$$s_i = \min\left(\frac{TF_i}{TPT}, 1\right)$$

- Si $TF_i \leq TPT$, entonces $s_i = TF_i/TPT$ (normalización).
- Si $TF_i > TPT$, $s_i = 1$ (recorte del valor atípico).

La suma de holguras ajustada se expresa como:

$$\sum TF_i = TPT \cdot \sum s_i$$

De esta manera, se garantiza que cada contribución está en $[0, TPT]$, y que la suma total de las holguras queda acotada.

Por lo tanto, *Project Tightness* será:

$$PT = 1 - \frac{\sum TF_i}{(n-r) TPT} = 1 - \frac{TPT \cdot \sum s_i}{(n-r) TPT} = 1 - \frac{\sum s_i}{n-r} \Rightarrow 0 \leq PT \leq 1$$

3. Propiedades

En esta sección se describen las principales propiedades teóricas del indicador *Project Tightness* (PT), que permiten comprender su comportamiento y justificar su validez como medida de la tensión estructural de un cronograma. En particular, se analizan su acotación en el rango $[0,1]$, su invariancia frente a transformaciones temporales homogéneas y su carácter monótono ante variaciones en las holguras y en la estructura crítica del proyecto. Estas propiedades constituyen la base conceptual que sustenta la interpretación y aplicabilidad del indicador en distintos contextos de planificación y control.

- **Acotación** (para una red CPM estándar: $TF_i \leq TPT \Rightarrow 0 \leq PT \leq 1$).
- **Invariancia temporal**: al escalar duraciones por $k > 0$ (por ejemplo, al pasar de días a horas, $k=8$), TF_i y TPT se escalan también, pero PT no cambia.
- **Monotonidad (crítica paralela)**: añadir actividades críticas fuera del camino crítico con mayor número de actividades (considerando TPT y $\sum TF_i$ constantes) aumenta n ($r = \text{cte.}$) \Rightarrow aumenta $(n-r) \Rightarrow$ aumenta PT .
- **Casos límite**:
 - Red tipo serie (un único camino con $r = n$): definimos por convención $PT = 1$ (tensión máxima).
 - Red con holguras amplias y $r \ll n$: $PT \rightarrow 0$, (tensión baja).

4. Procedimiento de cálculo

El cálculo del indicador *Project Tightness* (PT) se basa en la red de precedencias del proyecto y en la duración estimada de sus actividades. El procedimiento general puede resumirse en los siguientes pasos:

- **Cálculo de holguras individuales**

Se determinan las holguras totales TF_i de cada actividad mediante el análisis del camino crítico, aplicando el método CPM (*Critical Path Method*). Se determina en este paso la duración planificada del proyecto, TPT .

- **Identificación del camino crítico dominante**

Entre los posibles caminos críticos, se selecciona aquel con mayor número de actividades r , que se considera el *camino crítico dominante*. $r = \max_{P \in \mathcal{P}_C} |P|$

- **Determinación del conjunto de actividades no críticas**

Se identifican las actividades que no pertenecen al camino crítico dominante. El número total de dichas actividades es $n - r$, donde n representa el total de actividades del proyecto.

- **Cálculo del indicador de tensión del proyecto (PT)**

El valor final del indicador se obtiene directamente a partir de la suma de las holguras de todas las actividades y de la estructura crítica identificada:

$$PT = 1 - \frac{\sum TF_i}{(n - r) \times TPT}$$

De este modo, valores de PT próximos a 1 reflejan una mayor tensión estructural (cronogramas ajustados y con escasa holgura efectiva), mientras que valores cercanos a 0 indican una estructura más relajadas, con mayor flexibilidad temporal.

Este procedimiento permite calcular de forma sistemática el indicador *Project Tightness* y comparar cronogramas de distinto tamaño, duración o configuración topológica, manteniendo la coherencia y reproducibilidad del análisis.

5. Ejemplo ilustrativo

Con el fin de facilitar la comprensión y aplicación práctica del indicador *Project Tightness* (PT), en este apartado se presenta un ejemplo ilustrativo basado en un proyecto sencillo (Fig. 1). A través de él se muestran los pasos del procedimiento de cálculo, desde la obtención de holguras hasta la determinación del valor final de PT , así como la interpretación de los resultados obtenidos. Este ejemplo permite verificar el cumplimiento de las propiedades teóricas descritas y apreciar la capacidad del indicador para distinguir distintos grados de tensión estructural en los cronogramas de proyecto.

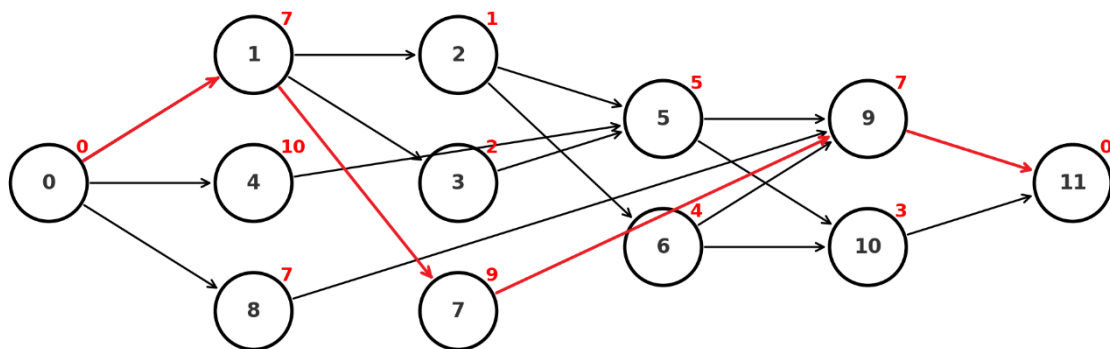


Figura 1. Diagrama AON correspondiente al proyecto de ejemplo

- **Cálculo de holguras individuales**

Nº de actividades del proyecto: $n = 10$. Actividad 0 y 11 son actividades ficticias, de inicio y fin de proyecto, respectivamente.

Camino crítico formado por las actividades: $A1 - A7 - A9$ (flechas en color rojo en Fig. 1)

Duración del camino crítico (TPT): $TPT = 23$

Holguras de las actividades que no pertenecen al camino crítico: $HA_2 = 3$; $HA_3 = 2$; $HA_4 = 1$; $HA_5 = 1$; $HA_6 = 4$; $HA_8 = 9$; $HA_{10} = 5$

- **Identificación del camino crítico dominante**

Camino crítico dominante: sólo existe un camino crítico ($A1 - A7 - A9$)

Nº de actividades que pertenecen al camino crítico: $r = \max_{P \in \mathcal{P}_c} |P| = 3$

- **Determinación del conjunto de actividades no críticas**

Actividades que no pertenecen al camino crítico dominante: $n - r = 10 - 3 = 7$.

- **Cálculo del indicador de tensión del proyecto (PT)**

$$PT = 1 - \frac{\sum TF_i}{(n - r) TPT} = 1 - \frac{(3 + 2 + 1 + 1 + 4 + 9 + 5)}{(10 - 3) 23} = 1 - \frac{25}{7 \times 23} = 0.845$$

6. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado *Project Tightness* (PT) como una medida simple, normalizada y operativa de la tensión del cronograma, que integra el nivel de holgura y su organización con respecto al camino crítico dominante. A diferencia de XSLACK-R, PT distingue casos con igual holgura media pero resiliencia distinta (por ejemplo, cuando existen caminos críticos paralelos), ofreciendo así una lectura más útil para análisis comparativos y para la toma de decisiones en planificación y seguimiento de proyectos. El indicador es acotado $[0,1]$, invariante a cambios de escala temporal y monótono ante incrementos de crítica paralela, lo que favorece su interpretabilidad y comparabilidad entre proyectos.

Como líneas de aplicación, proponemos reportar PT junto con el indicador SP (I_2 , serie/paralelo) para mejorar la segmentación de redes y orientar la elección de estrategias de control. Entre las limitaciones, la definición actual se apoya en el método del camino crítico (CPM) sin recursos; por ello planteamos validar empíricamente PT en bases reales, desarrollar versiones con recursos y calendarios, y explorar su papel como moderador en modelos de rendimiento (predicción, análisis de sensibilidad y riesgo), incluyendo mapas de decisión en el plano (I_2, PT) y análisis de robustez bajo incertidumbre.

7. Bibliografía

- Kosztján, Z. T., Novák, G., Jakab, R., Szalkai, I., & Hegedűs, C. (2023). A matrix-based flexible project-planning library and indicators. *Expert Systems with Applications*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119472>
- Kosztján, Z. T., & Novák, G. L. (2024). Project indicators and flexible project structure generators. *Journal of Computational Science*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.102203>
- Patterson, J. H. (1976). Project scheduling: The effects of problem structure on heuristic performance. *Naval Research Logistics Quarterly*, John Wiley & Sons, 23(1), 95–123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/nav.3800230110>
- Song, J., Song, J., Browning, T., & Vanhoucke, M. (2026). Project monitoring and control with an empirically grounded budget-release model. *European Journal of Operational Research*, 328(2), 646–667. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2025.06.007>
- Song, J., Song, J., & Vanhoucke, M. (2025). Automatic selection of the best performing control point approach for project control with resource constraints. *European Journal of Operational Research*, 322(1), 15–38. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.025>
- Song, Y., & Vanhoucke, M. (2025). Schedule risk analysis for project control with risk interactions. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06668-8>

- Tavares, L. V. (1999). Advanced Models for Project Management. In *Advanced Models for Project Management*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8626-9>
- Tavares, L. V, Ferreira, J. A., & Coelho, J. S. (2002). A comparative morphologic analysis of benchmark sets of project networks. *International Journal of Project Management*, 20(6), 475–485.
- Ünsal Altuncan, I., & Vanhoucke, M. (2025). Duration forecasting in resource constrained projects: A hybrid risk model combining complexity indicators with sensitivity measures. *European Journal of Operational Research*, 325(2), 329–343. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2025.03.012>
- Vanhoucke, M. (2010). Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance. *Omega*, 38(5), 359–370. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2009.10.001>
- Vanhoucke, M. (2011). On the dynamic use of project performance and schedule risk information during project tracking. *Omega*, 39(4), 416–426. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.09.006>
- Vanhoucke, M., Coelho, J., Debels, D., Maenhout, B., & Tavares, L. V. (2008). An evaluation of the adequacy of project network generators with systematically sampled networks. *European Journal of Operational Research*, 187(2), 511–524. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.03.032>
- Vanhoucke, M., Coelho, J., Debels, D., & Tavares, L. (2004). *On the morphological structure of a network*. <http://hdl.handle.net/20.500.12127/1686>
- Vaseghi, F., Martens, A., & Vanhoucke, M. (2024). Analysis of the impact of corrective actions for stochastic project networks. *European Journal of Operational Research*, 316(2), 503–518. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.02.040>