

(09-017) - Visual IT tool to facilitate project scheduling with heuristic methods based on priority rules

Ponluisa Marcalla, Neisser Fernando ¹; Capuz-Rizo, Salvador F. ²

¹ Universidad Politécnica de Valencia, ² Universitat Politècnica de València

In a dynamic work environment, professionals starting in project management face constant challenges, demanding relevant skills and competencies. Educational institutions strive to cultivate in students' skills that meet current demands and prepare them for the future. This work aims to design an interactive computer tool that facilitates the practical understanding of methods for scheduling projects with limited resources (RCPSP), based on priority rules. The tool has been developed using VBA programming, enabling visual interaction and adjustment of scheduling through activity shifting. Additionally, it provides a graphical representation of assigned or over-allocated resources. It includes an instructional example with 11 activities, their dependencies, and resource requirements per time unit, and incorporates five priority-based methods. Through visual interactivity, students can explore how these methods affect scheduling and resource allocation. In summary, the tool offers a hands-on experience in project management, equipping students with valuable skills to tackle programming challenges with limited resources.

Keywords: IT tool; Heuristic methods; Priority rules; Project Scheduling; Interactive learning

Herramienta informática visual para facilitar la programación de proyectos con métodos heurísticos basados en reglas de prioridad

En un entorno laboral dinámico, los profesionales que se inician en la dirección de proyectos enfrentan desafíos constantes, exigiendo habilidades y competencias relevantes. Las instituciones educativas se esfuerzan por cultivar en los estudiantes habilidades que satisfagan las demandas actuales y los preparen para el futuro. El objetivo de este trabajo es diseñar una herramienta informática interactiva que facilite la comprensión práctica de métodos para la programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP), basados en reglas de prioridad. La herramienta ha sido desarrollada con programación VBA, permitiendo la interacción visual y el ajuste de la programación mediante el desplazamiento de las actividades. Además, ofrece una representación gráfica de los recursos asignados o sobreasignados. Incluye un ejemplo didáctico con 11 actividades, sus dependencias y requerimientos de recursos en cada unidad de tiempo, e incorpora cinco métodos basados en reglas de prioridad. A través de la interactividad visual, los estudiantes pueden explorar cómo estos métodos afectan la programación y asignación de recursos. En resumen, la herramienta ofrece una experiencia práctica en la gestión de proyectos, preparando a los estudiantes con habilidades valiosas para abordar desafíos de programación con recursos limitados.

Palabras clave: Herramienta informática; Métodos heurísticos; Reglas de prioridad; Programación de proyecto; Aprendizaje interactivo

Correspondencia: Neisser Ponluisa, Correo: neisser.ponluisa@outlook.com

Agradecimientos: Mi profundo agradecimiento a Salvador Capuz-Rizo mi tutor y a los profesores del Máster de Dirección y Gestión de Proyectos de la Universitat Politècnica de València.



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El avance tecnológico de los últimos años ha dado lugar al desarrollo de numerosas herramientas informáticas dedicadas a la gestión y programación de proyectos. En un entorno donde la gestión eficiente de los proyectos es crucial para los directores de proyectos, debido a la creciente complejidad de los proyectos y las dificultades para obtener los recursos necesarios, estas herramientas han sido diseñadas para facilitar la programación, planificación y control de los proyectos. Principalmente, se basan en los métodos clásicos PERT (Program Evaluation and Review Technique) y CPM (Critical Path Method), que son ampliamente abordados por instituciones de enseñanza sobre gestión de proyectos.

Sin embargo, a pesar de la utilidad de estas herramientas informáticas, en su mayoría funcionan como cajas negras, sin ofrecer una visión detallada del proceso que está detrás de las soluciones que proporcionan. Esta carencia ha generado una escasez de recursos dedicados a la enseñanza de la resolución de problemas relacionados con la sobreasignación de recursos.

De igual manera, ocurre con las aplicaciones informáticas que abordan los métodos heurísticos para la programación de proyectos con recursos limitados. Estas herramientas no proporcionan una visión detallada del proceso mediante el cual se llega a las diferentes soluciones, ni presentan una interfaz visual que facilite su comprensión y su experimentación práctica. Esto se debe en gran medida a que la mayoría de los experimentos se llevan a cabo utilizando la librería PSPLIB (Project Scheduling Problem Library) desarrollada por Kolish y Sprecher en 1997.

Dentro de la amplia gama de soluciones proporcionadas por los métodos heurísticos, se debe destacar los métodos basados en reglas de prioridad que están derivados de los métodos clásicos (PERT/CPM). Estos métodos ofrecen una alternativa efectiva en situaciones que requieren flexibilidad, adaptabilidad y facilidad de implementación. Su cálculo es simple de realizar, lo que los convierte en enfoques valiosos para los directores de proyectos en la búsqueda de una ventaja competitiva. Ante esta situación, surge la necesidad de elaborar una herramienta informática que permita explorar y comprender los métodos heurísticos basados en reglas de prioridad.

Por lo tanto, en este trabajo se presenta una herramienta informática diseñada para facilitar la enseñanza y la práctica de estos métodos. Con el objetivo de mejorar la comprensión y la eficiencia en la programación de proyectos, esta herramienta informática permitirá a los estudiantes aprender, practicar, practicar y comparar diferentes estrategias para la asignación de recursos y la programación de proyectos. Además de ofrecer una interfaz fácil de usar, la herramienta incluye un ejemplo de proyecto que ilustra la aplicación de cinco métodos de reglas de prioridad. Esto proporciona a los estudiantes un entorno práctico para comprender y aplicar estos conceptos.

2. Revisión de la literatura de los métodos heurísticos para la programación de proyectos con recursos limitados

Los métodos pioneros en la programación de proyectos son los métodos clásicos PERT y CPM (Fondhal, 1961). Estos métodos permiten la identificación de las actividades críticas al proporcionar información sobre la vinculación, la dependencia y la duración de cada una de las actividades, lo que determina la duración total del proyecto. Sin embargo, estos métodos no tienen en cuenta la disponibilidad de los recursos ni las restricciones del proyecto. La representación de estos métodos se realiza a través de los diagramas red y diagrama de GANTT, lo que facilita una comprensión visual clara al mostrar las actividades a ejecutarse, el orden de ejecución y los hitos más importantes del proyecto (Piñeiro, 1995).

Durante el proceso de la programación, se definen las fechas de inicio y fin, las precedencias entre actividades, los recursos disponibles y las restricciones o limitaciones que tiene el proyecto. En situaciones donde existen limitaciones o restricciones en la disponibilidad de recursos, es necesario recurrir a métodos que permitan abordar este problema de manera realista, eficaz y eficiente.

Entre los métodos que permiten encontrar soluciones se incluyen los métodos exactos, heurísticos, multicriterio, híbridos, redes Petri e inteligencia artificial, así como combinaciones entre métodos. Estos métodos están en una constante evolución para ser más adaptables y buscar una mayor eficiencia en la gestión de los recursos (Wilson, 2003; Kolish y Hartmann, 2006).

Varios de estos métodos representan contribuciones significativas que ofrecen nuevas perspectivas y herramientas valiosas, impulsando el progreso continuo en el ámbito de la programación de proyectos. Algunos de los métodos anteriormente mencionados se pueden revisar en la bibliografía, la cual incluye trabajos de Brucker et al. (1999); Kolisch y Hartmann (2006); Valls, Ballestín y Quintanilla (2008); Morillo, Moreno y Díaz (2014a); Morillo, Moreno y Díaz (2014b); Abdolshah (2014); Mejía et al. (2015); Moradi et al. (2019); Golab et al. (2022). Cada uno de estos métodos tiene sus particularidades, adaptándose a las dimensiones y características específicas de los proyectos. Se ha comprobado que los métodos heurísticos son eficaces en la solución de problemas de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP), y son ampliamente reconocidos como una opción preferida (Alvarez y Tamarit, 1989b).

No obstante, es importante señalar que estos métodos pueden resultar complejos para los directores de proyectos, ya que los experimentos se han llevado a cabo en lenguajes de programación o software especializado, requiriendo un conocimiento previo. En este sentido, Simón, Peña y Rincón (2014) destacan que los métodos heurísticos basados en reglas de prioridad son los más populares y fáciles de implementar. Además, Song, Jia y Peng (2022) señalan que estos métodos son los más utilizados debido a su lógica intuitiva, comprensión y facilidad de cálculo.

Alvares y Tamarit (1989) presentan seis reglas heurísticas estas son MTS (Most Total Succesors), GRPW (Greatest Rank Positional Weight), LST (Latest Start Time), LFT (Latest Finish Time), RSM (Resource Scheduling Method) y CUMRED (Cumulative Resource Equivalent Duration) que permiten obtener resultados favorables con un conocimiento básico en la programación de proyectos. Por otro lado, Kolisch y Hartmann (1999) presentan un análisis de varios de los métodos mencionados anteriormente por Alvares y Tamarit, además agregan otros métodos como son MSLK (Minimum Slack), SPT (Shortest Processing Time) y WCS (Worst Case Slack), determinando que el método LFT presenta mejores resultados. Chand, Singh y Ray (2019) destacan que las reglas de prioridad son esenciales para la toma rápida de decisiones en entornos dinámicos, ofreciendo una forma eficaz de programar actividades. A pesar de que los métodos no ofrezcan los mejores resultados, son esenciales para resolver problemas grandes en periodos cortos, además, son fundamentales para establecer soluciones iniciales a nuevos procedimientos de métodos (Kolisch y Hartmann, 1999).

En un contexto más actual, un estudio realizado por Ponluisa en 2023, en la tabla 2 se identificaron 63 métodos heurísticos basados en reglas de prioridad, de los cuales se seleccionaron cinco de los más estudiados (LFT, MSLK, MST, LST y GRPW). Basándose en estos métodos, se desarrollará una herramienta informática que permitirá comprender de manera práctica su funcionamiento, especialmente en lo que respecta a la variación de prioridades de las actividades. Esta herramienta ofrecerá una experiencia visual y práctica para observar cómo cambian las asignaciones de recursos y cómo se optimizan en función de las prioridades establecidas. Además, la herramienta servirá como una herramienta de

enseñanza, facilitando a los profesores la explicación de estos métodos a los estudiantes una vez que hayan aprendido PERT y CPM.

3. Objetivos del trabajo

3.1. Objetivos Generales

Desarrollar una herramienta informática usando lenguaje de programación VBA (Visual Basic for Application) dentro del entorno de Excel. Esta herramienta contendrá un ejemplo de proyecto con los cinco métodos heurísticos basados en reglas de prioridad mencionados anteriormente.

Brindar apoyo a los profesores que imparten enseñanzas sobre los métodos PERT/CPM, permitiéndoles ampliar su enseñanza a estos métodos heurísticos de programación de proyectos. Esto proporcionará a los estudiantes una ventaja competitiva al adquirir un conocimiento más amplio y práctico en la gestión de proyectos.

Facilitar a los estudiantes la experimentación con el proyecto incluido en la herramienta, lo que les permitirá observar cómo varía la duración y la disponibilidad de los recursos cuando se modifican las prioridades de las actividades.

3.2. Desarrollo de la herramienta informática

El desarrollo de la herramienta informática se llevó a cabo utilizando el lenguaje de programación VBA en Excel. La elección de Excel se basó en su amplia disponibilidad y familiaridad tanto en entornos educativos como profesionales. Esta elección nos permitió trabajar de manera sencilla y visual con la representación de datos. Además, VBA, conocido comúnmente como macros, ofrece una integración completa con las características y funcionalidades de Excel, lo que facilita la manipulación de los datos para crear interfaces interactivas. Estas características fueron esenciales en el desarrollo de la aplicación que se describe en detalle en las secciones siguientes. En estas secciones se presentará el ejemplo utilizado, los cinco métodos heurísticos basados en reglas de prioridad, se explicará el funcionamiento de la herramienta, se detallarán los principales códigos de programación, se identificarán sus limitaciones y se proporcionarán instrucciones detalladas sobre cómo utilizarla.

3.3. Métodos heurísticos basados en reglas de prioridad

a) Latest Finish Time (LFT)

El enfoque de este método es priorizar las actividades según el tiempo más tardío de finalización. Su cálculo se realiza de la siguiente manera $LFT(j) = LST(j) + dj$, donde $LST(j)$ representa el tiempo más tardío de inicio de la actividad j y dj su duración. Si LFT es igual a LST la actividad debe empezar inmediatamente porque no tiene margen para retrasos. Por otro lado, si LFT es mayor que LST significa que puede empezar más tarde antes de volverse crítica y puede afectar al proyecto.

b) Maximum Succesor Total (MST)

El método MST prioriza las actividades según el número total de actividades sucesoras que tienen. Se enfoca en aquellas actividades con más dependencias, ya que su retraso podría afectar significativamente al proyecto. Al darles prioridad, se busca garantizar su finalización a tiempo y evitar posibles retrasos en otras actividades.

c) Most Slack Time (MSLK)

El método MSLK prioriza actividades según el tiempo antes de la fecha límite. Se calcula como $MSLK(j) = LFTj - ESTj - dj$, donde $ESTj$ es el tiempo de inicio más temprano de la actividad j ,

y d_j es la duración de la actividad j . Ayuda a identificar actividades críticas que deben completarse a tiempo para cumplir los plazos del proyecto.

d) Latest Start Time (LST)

El método LST prioriza actividades que pueden comenzar más tarde sin afectar la duración total del proyecto. Se calcula $LST(j) = LFT_j - d_j$, donde j es la actividad y d_j es la duración. Si el LST es mayor que su EST, indica que tiene un margen de tiempo disponible antes de volverse crítica para el proyecto, permitiendo una mejor gestión de recursos y evitando posibles demoras.

e) Greatest Resource Position Weight (GRPW)

El método prioriza actividades asignando pesos basados en su duración y la suma de las duraciones de sus sucesoras. El peso se calcula así $GRPW = d_j + \sum_{i \in S(j)} d_i$, donde d_i es la duración de la sucesora (i), y $S(j)$ es el conjunto de todas las sucesoras de j . Esto facilita la identificación y asignación de recursos a las actividades más críticas para asegurar su finalización oportuna.

3.4. Descripción del ejemplo de proyecto

Se ha propuesto un ejemplo de proyecto que consta de 11 actividades, detalladas en la tabla 1, para demostrar la aplicación de los métodos seleccionados según la investigación llevada a cabo por Ponluisa y Salvador en 2023. Estos métodos son LFT (Latest Finish Time), MSLK (Most Slack Time), MST (Most Slack Time), LST (Late Start Time) y GRPW (Greatest Resource Position Weight). Estas actividades tienen una duración específica y están interconectadas mediante dependencias, además de contar con la disponibilidad limitada de un recurso específico, restringido a 6 unidades disponibles por día. El objetivo principal de aplicar estos métodos es comparar la duración total del proyecto con la solución proporcionada por el software MS Project. Se busca abordar específicamente el desafío de programar proyectos con recursos limitados, explorando las mejores opciones de programación para obtener una visión más realista de la duración del proyecto y la optimización de los recursos. La comparación con MS Project proporcionará información valiosa sobre la eficacia relativa de los enfoques de programación utilizados.

Tabla 1: Ejemplo de proyecto

Actividad	Duración	Dependencia	Recursos x día
A	2		4
B	5	A	5
C	4	B	2
D	3	B	4
E	5	B	2
F	5	C	4
G	4	D	2
H	3	D, E	2
I	7	F	2
J	5	H	2
K	3	I, G, J	3

4. Funcionalidades de la herramienta

La herramienta informática no solo proporciona una solución técnica, sino que también representa una valiosa oportunidad para enriquecer la enseñanza en el ámbito de la gestión de proyectos. Su objetivo es respaldar la docencia en la programación de proyectos con recursos limitados, ampliando el conocimiento impartido por los docentes a los estudiantes una vez adquieran una comprensión sólida de los fundamentos de PERT y CPM. Además,

busca facilitar la aplicación práctica de cinco métodos heurísticos basados en reglas de prioridad, lo que les permite a los usuarios explorar y comprender los métodos LFT, MSLK, MST, LST y GRPW. Esto brinda a los estudiantes la oportunidad de adquirir nuevas destrezas en la gestión de proyectos y abordar desafíos con mayor confianza y eficacia.

Por consiguiente, la herramienta permite la selección de uno de los cinco métodos disponibles, activando una macro para actualizar la tabla del proyecto y el gráfico del Calendario de Programación de Proyecto. La tabla del proyecto proporciona información detallada sobre las actividades, su duración, dependencia y recursos, así como columna de la regla aplica con los datos de los cálculos y finalmente la columna donde se pone la prioridad según el método seleccionado, estas dos últimas columnas se actualizan cuando se escoge el método.

Por otro lado, la herramienta tiene un Calendario de Programación de Proyecto que se actualiza para reflejar visualmente la duración de cada una de las actividades del proyecto. El desplazamiento de actividades se realiza a través de Spinbuttons asociados a cada actividad, lo que permite ajustar la programación hacia adelante o hacia atrás en el tiempo. Para estos desplazamientos se utilizan macros que garantizan el desplazamiento y que no permiten que se desplacen a hacia atrás porque el Spinbutton toma como valor mínimo la duración de su actividad predecesora, evitando que una actividad se programe antes de que se completen sus predecesoras. Sin embargo, para el desplazamiento para delante no tiene en cuenta la dependencia haciéndole versátil para cambiar la programación y dar prioridades. Esto facilita la gestión dinámica de la programación del proyecto, permitiendo a los estudiantes experimentar la optimización y asignación de recursos con el fin de minimizar los tiempos o evitar la sobreasignación.

Adicionalmente, la herramienta también cuenta con un Gráfico de Recursos que ofrece una representación clara de la disponibilidad y uso de recursos para cada actividad. Utilizando una paleta de colores intuitiva, el azul indica la cantidad de recursos necesarios, el naranja refleja los recursos aún no asignados y el rojo señala una asignación excesiva de recursos. Esta visualización permite a los usuarios identificar de manera rápida y precisa la distribución de recursos y detectar posibles problemas de sobreasignación.

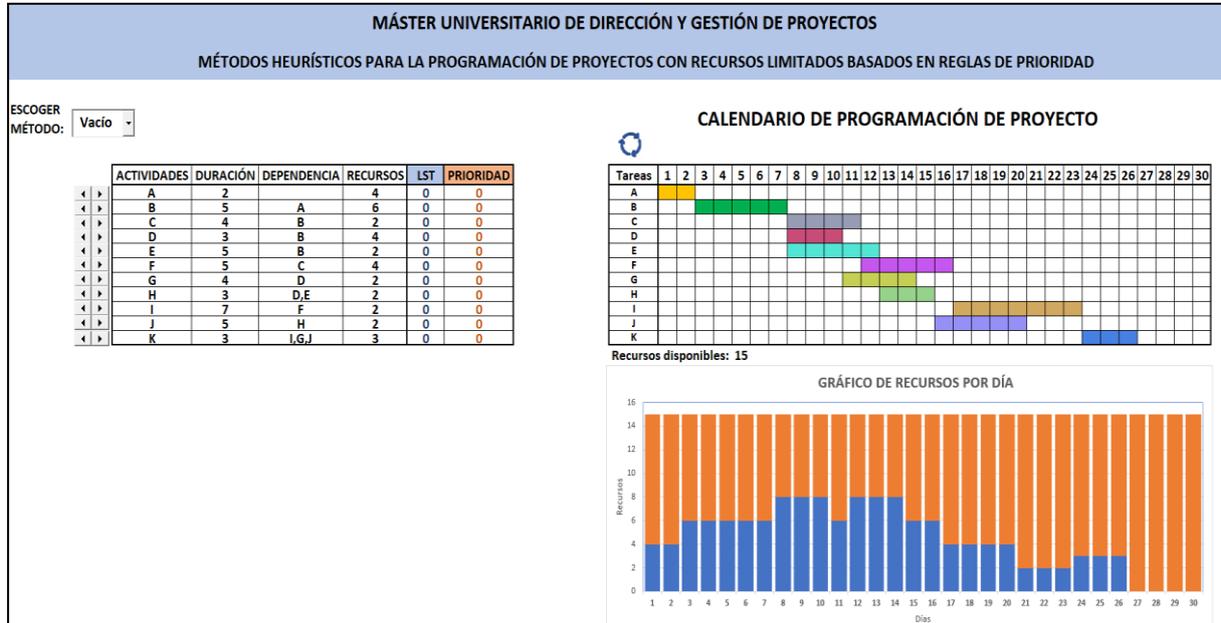
Estas funcionalidades proporcionan que la herramienta sea interactiva y educativa para explorar y comprender los métodos heurísticos basados en reglas de prioridad en la programación de proyectos con recursos limitados. Es una opción de enseñanza integral que permite no solo conocer los conocimientos básicos, sino también conocer otras opciones en la programación de proyectos, además, proporciona una educación enriquecedora, debido a que se desarrollan nuevas habilidades en los estudiantes, preparándolos para enfrentar desafíos reales en su carrera profesional.

En resumen, las funcionalidades por destacar son las siguientes:

- *Selección de Método:* Permite elegir entre los cinco métodos heurísticos propuestos para la programación de proyectos y actualiza automáticamente la tabla del proyecto y el gráfico de programación.
- *Interfaz Intuitiva:* Fácil de usar para docentes y estudiantes, facilitando interacción y comprensión de las funcionalidades.
- *Desplazamiento de Tareas:* Permite desplazar las actividades hacia atrás y delante utilizando un botón (spinbutton), asociados a cada actividad.
- *Visualización de Recursos:* Muestra visualmente la variación de los recursos a lo largo del tiempo, ayudando a comprender su asignación y su impacto en el proyecto.
- *Apoyo a la Enseñanza:* Diseñada para apoyar a los docentes en la enseñanza de métodos heurísticos basados en reglas de prioridad, ofreciendo una experiencia práctica a los estudiantes.

En la figura 1 se puede observar la herramienta informática desarrollada para la programación de proyectos con recursos limitados mediante métodos heurísticos basados en reglas de prioridad.

Figura 1: Herramienta informática para programación de proyectos



5. Descripción de los bloques de programación

La macro desarrollada para esta herramienta está diseñada para automatizar diversas tareas relacionadas con la programación de proyectos. A continuación, se detallan las funciones más importantes del código de programación:

5.1. Selección del método y actualización de la tabla

Al cambiar la selección del método en el ComboBox, se ejecutan una serie de funciones y subrutinas. Estas rutinas incluyen la actualización de la tabla de características del proyecto según el método escogido, se realiza la limpieza de la tabla del calendario del proyecto en donde se encuentra las características del proyecto, pinta de color de las celdas del calendario del proyecto, además asigna en cada de las celdas pintadas asigna el valor de los recursos para contabilizar los recursos necesarios por periodo de tiempo. Esta estructura de código contribuye a la funcionalidad integral de la herramienta al ofrecer una representación visual clara y dinámica del proyecto en curso.

5.2. Calendario de programación de proyecto

La función principal utilizada para mostrar el calendario de programación de proyecto es la subrutina pintarCeldas. Dentro de esta subrutina son necesario dos funciones. La función ObtenerColor determina el color de las celdas del calendario basado en el número de filas que representan las actividades, proporcionando una representación visual clara de las actividades. La función BuscarFilaActividad para encontrar la fila correspondiente a una actividad específica en el calendario del proyecto. Esta función recibe como argumentos la hoja de trabajo, el nombre de la actividad a buscar y el rango de filas donde realizar la búsqueda. Al ejecutarse, la función recorre las filas del rango especificado y compara el nombre de la actividad con el contenido de la columna de "ACTIVIDADES". Cuando encuentra una coincidencia, devuelve el número de fila donde se encontró la actividad. En caso de no

encontrar la actividad, la función devuelve el valor 0. Esta función es fundamental para localizar las actividades en el calendario y facilitar su manipulación dentro del código de la herramienta. La subrutina pintarCeldas combinada con las funciones antes mencionadas, realiza el pintando las celdas según las dependencias y la duración de las actividades, asegurando una representación precisa y dinámica del proyecto en curso.

5.3. Desplazamiento de las actividades

Con la finalidad de realizar el desplazamiento se implementa un código que permite desplazar las actividades en el calendario del proyecto mediante botones SpinButton. Estos botones, al ser girados hacia arriba (SpinUp) o hacia abajo (SpinDown), ejecutan el código correspondiente para realizar el desplazamiento. El código utiliza subrutinas para manejar los eventos de los botones, obteniendo los valores máximos y mínimos permitidos para el desplazamiento.

5.4. Gráfico para la visualización de los recursos

El gráfico para la visualización de recursos, se emplearon tres filas en cada columna del calendario de programación. En la primera fila, se sumaron los recursos utilizados por unidad de tiempo. La segunda fila presentó una función condicional que mostraba el valor si no superaba un límite, y la tercera fila, otra condicional que mostraba el valor si era mayor o igual al límite. Estas filas se asignaron a un gráfico de barras, donde se representó la variación de recursos con colores distintivos, permitiendo una interpretación clara de su disponibilidad a lo largo del tiempo en el proyecto.

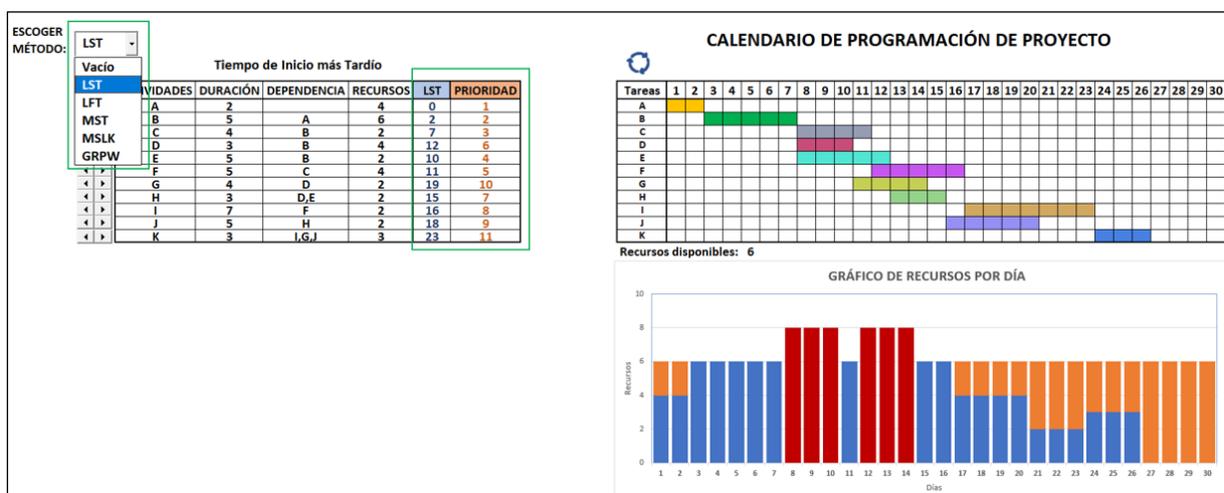
6. Instrucciones de funcionamiento

Las instrucciones de uso de la aplicación, sin indica en esta sección con la finalidad que se pueda entender cómo funciona.

6.1. Selección del método

En la aplicación se encuentra un menú desplegable (Ver figura 2) donde se puede escoger uno de los cinco uno de los cinco métodos heurísticos disponibles: LFT, MST, MSLK, LST y GRPW. Esta selección activará automáticamente la actualización de la tabla del proyecto y el gráfico de programación, ver figura 2.

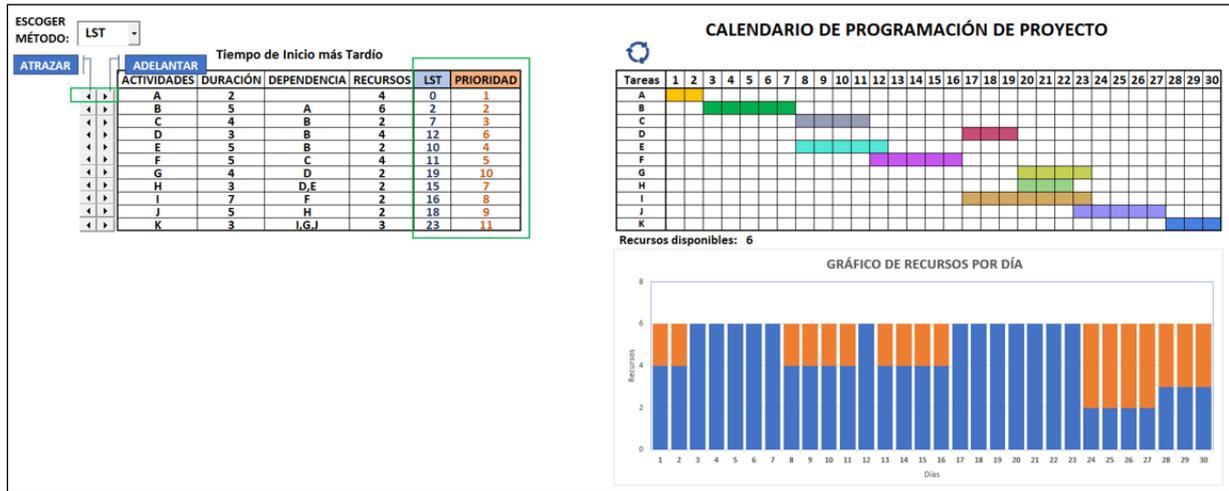
Figura 2: Selección del método



6.2. Desplazamiento de las actividades

Para ajustar la programación del proyecto, se pueden utilizar los botones de desplazamiento disponibles. Estos botones permiten desplazar las actividades hacia adelante o hacia atrás en el tiempo, ajustando así la programación del proyecto de manera dinámica. El desplazamiento de las actividades debe realizarse según indica la columna de prioridades, teniendo en cuenta si hay recursos disponibles para ejecutar las actividades en esa unidad de tiempo y así conseguir la programación del proyecto, ver figura 3.

Figura 3: Botones de desplazamiento



6.3. Reiniciar el cronograma

Esta opción de reiniciar el cronograma nos permite volver a empezar cuando hemos perdido la secuencia de la programación según las prioridades del método, ver figura 3.

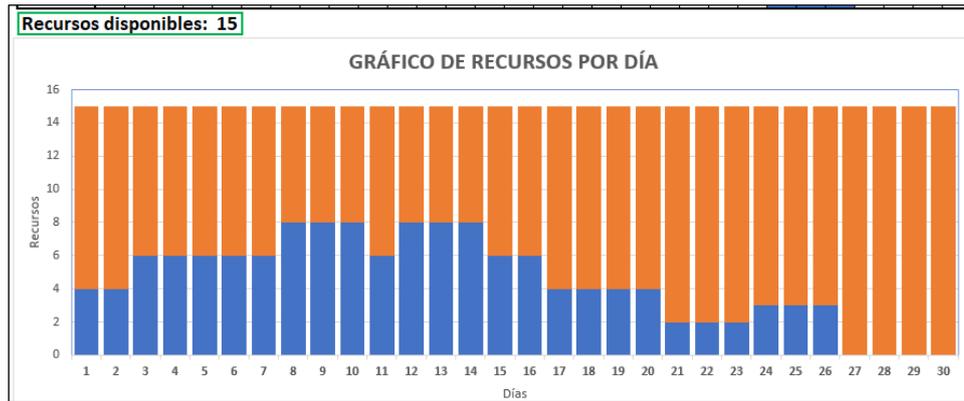
Figura 3: Botones de desplazamiento



6.4. Asignar recursos

Es posible modificar la cantidad de recursos disponibles para cada unidad de tiempo de manera sencilla, ya que el estudiante puede ingresar la cantidad requerida directamente en la interfaz de la herramienta, tal como se muestra en la figura 4. Esta flexibilidad permite adaptar rápidamente la asignación de recursos según las necesidades específicas del proyecto en curso, ofreciendo una gestión más dinámica.

Figura 4: Asignar recursos



6.5. Cambiar los datos de la regla y la prioridad

La columna de la regla y la prioridad es posible cambiar los datos además de los que ya existen, esta funcionalidad se implementa con el propósito de consolidar toda la información en una única tabla, lo que agiliza considerablemente los desplazamientos de las actividades, como se observa en la figura 5.

Figura 5: Columna de la regla y prioridad

	ACTIVIDADES	DURACIÓN	DEPENDENCIA	RECURSOS	LST	PRIORIDAD
◀ ▶	A	2		4	0	0
◀ ▶	B	5	A	6	0	0
◀ ▶	C	4	B	2	0	0
◀ ▶	D	3	B	4	0	0
◀ ▶	E	5	B	2	0	0
◀ ▶	F	5	C	4	0	0
◀ ▶	G	4	D	2	0	0
◀ ▶	H	3	D,E	2	0	0
◀ ▶	I	7	F	2	0	0
◀ ▶	J	5	H	2	0	0
◀ ▶	K	3	I,G,J	3	0	0

7. Conclusiones

El uso de la herramienta desarrollada ofrece a los docentes una oportunidad para expandir su enseñanza más allá de los métodos clásicos de PERT/CPM. Sin embargo, es importante destacar que esta herramienta requiere que los estudiantes cuenten con conocimientos previos de los métodos PERT y CPM, que realicen cálculos manuales de diferentes métodos heurísticos. Aunque pueda parecer una barrera inicial, este enfoque no solo amplía el conocimiento existente de los estudiantes, sino que también fomenta el desarrollo de nuevas habilidades para abordar problemas de programación de proyectos con recursos limitados de manera más eficaz. En este sentido, la herramienta no solo mejora la comprensión de los métodos tradicionales, sino que también prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos más complejos en la gestión de proyectos.

La capacidad de la herramienta para ajustar y visualizar la programación de manera intuitiva la hace invaluable para mejorar la planificación en proyectos, incluso aquellos con hasta 11 actividades y una duración de 30 días. Los docentes pueden aprovechar esta herramienta para expandir su enseñanza más allá de los métodos clásicos de PERT/CPM, lo que enriquece la experiencia educativa de los estudiantes y los prepara mejor para enfrentar desafíos reales en la gestión de proyectos. A pesar de que la herramienta ofrece

funcionalidades significativas, como la capacidad de observar cómo se comportan los recursos durante la programación de actividades, existen limitaciones, como el cálculo manual de prioridades y el número máximo de dependencias por actividad. Estas limitaciones señalan oportunidades de mejora, especialmente en el desarrollo de algoritmos más avanzados para la asignación automática de prioridades, lo que podría mejorar significativamente la eficiencia y la utilidad de la herramienta.

Finalmente, la herramienta permite observar cómo se comportan los recursos a medida que se ajusta la programación de las actividades representa una ventaja significativa. Este aspecto proporciona una visión más clara y precisa de la asignación de recursos, lo que puede ser fundamental para tomar decisiones más acertadas en la optimización de recursos durante la gestión de proyectos. Esta funcionalidad no solo beneficia a los estudiantes al brindarles una comprensión más profunda de la gestión de recursos, sino que también aporta de valor a los profesionales en el campo, al proporcionarles un mejor conocimiento de los métodos heurísticos basados en reglas de prioridad.

7.1. Limitaciones

La aplicación desarrollada presenta ciertas limitaciones que podrían afectar su utilidad en ciertos escenarios. Por ejemplo, está restringida a proyectos con un máximo de 11 actividades, lo que podría limitar su aplicabilidad en proyectos más grandes y complejos. Además, la duración total del proyecto está limitada a un máximo de 30 unidades de tiempo de ejecución, lo que podría no ser suficiente para proyectos de mayor envergadura.

Asimismo, la herramienta solo admite un tipo de recurso, lo que puede resultar restrictivo en proyectos que requieren la gestión de múltiples tipos de recursos. Otro aspecto limitante es que la herramienta solo permite hasta tres dependencias por actividad, lo que podría ser insuficiente en proyectos con relaciones más complejas entre las tareas.

Es fundamental tener en cuenta que la herramienta requiere que el estudiante tenga un conocimiento previo del diagrama PERT/CPM y realice los cálculos manualmente, ya que no cuenta con un algoritmo incorporado que calcule automáticamente las prioridades. Sin embargo, a pesar de estas restricciones, la herramienta logra cumplir con su objetivo principal al permitir la interacción con las actividades del proyecto y su desplazamiento en el tiempo, además de brindar la capacidad de observar cómo se comportan los recursos a medida que se ajusta la programación de las actividades.

8. Referencias

- Alvarez-Valdés, R., y Tamarit, J.M. (1989). Algoritmos heurísticos deterministas y aleatorios en secuenciación de proyectos con recursos limitados. *Qüestiió*, Vol 13, Nº 1-3, 173-191. https://dmle.icmat.es/pdf/QUESTIIO_1989_13_01-02-03_11.pdf.
- Chand, S., Singh, H., y Ray, T. (2019). Evolving heuristics for the resource constrained project scheduling problem with dynamic resource disruptions. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 897-912. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.09.007>.
- Fondhal, J.W. (1961). A Non-Computer Approach to the Critical Path Method for the Construction Industry. Tech Rept No 9, Ed. Stanford University, Stanford (California, USA).
- Golab, A., Gooya, E. S., Al Falou, A., y Cabon, M. (2022). A multilayer feed-forward neural network (MLFNN) for the resource-constrained project scheduling problem (RCPPSP). *Decision Science Letters*, 11. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2022.7.004>.

- Kolisch, R., y Hartmann, S. (2006). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. *European Journal of Operational Research*, 174, (23-37). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.065>.
- Kolisch, R., Hartmann, S. (1999). Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 50(2), 162-175. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5533-9_7.
- Mejía, G., Niño, K., Montoya, C., Sánchez, M. A., Palacios, J., y Amodeo, L. (2016). A Petri Net-based framework for realistic project management and scheduling: An application in animation and videogames. *Computers & Operations Research*, 66, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.08.011>.
- Moradi, M., Hafezalkotob, A., Vahidreza Ghezavati, V. (2019). Robust resource-constrained project scheduling problem of the project's subcontractors in a cooperative environment under uncertainty: Social complex construction case study. *Computers & Industrial Engineering*, 133, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.046>.
- Morillo, D., Moreno, L., y Díaz, J. (2014a). Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del problema de programación de tareas con recursos restringidos (RCPSP): una revisión Parte 1. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 17, 51-78. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v10n20/v10n20a13.pdf>.
- Morillo, D., Moreno, L., y Díaz, J. (2014b). Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del problema de programación de tareas con recursos restringidos (RCPSP): una revisión Parte 2. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 17, 51-78. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v10n20/v10n20a13.pdf>.
- Piñeiro, S. (1995). PERT y CPM: Programación y control de proyectos. *Cuadernos de Estudios Empresariales*, (5), 271-291. Servicio de Publicaciones UCM. Madrid.
- Ponluisa, N. (2023). Análisis y comparación de métodos heurísticos para la programación de proyectos con recursos limitados basados en reglas de prioridad. *Trabajo fin de máster*, Universitat Politècnica de València, Valencia (España).
- Simón, M., Peña, F., Rincón, P. (2014). Análisis de los métodos heurísticos de resolución del problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP: Resource Constrained Project Scheduling Problem). *Revista de Investigación en Educación*, 9, 34-45. https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/591.
- Song, H., Jia, G., y Peng, W. (2022). Bi-objective reactive project scheduling problem under resource uncertainty and its heuristic solution based on priority rules. *IEEE Access*, 10, 3175312. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175312>.
- Valls, V., Ballestín, F., Quintanilla, S. (2008). A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 185 (pp. 495-508). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.12.033>.
- Wilson, J. (2003). Gantt charts: A centenary appreciation. Elsevier, Scotland, UK. *European Journal of Operational Research*, 149, 430-437. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00769-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00769-5).

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

