

ON PROJECT SCHEDULING USING DSM

Gálvez, Edelmira D.¹; Cisternas, Luis A.²; Ordieres Meré, Joaquín³; Capuz-Rizo, Salvador F.⁴

¹ Universidad Católica del Norte, ² Universidad de Antofagasta, ³ Universidad Politécnica de Madrid, ⁴ Universitat Politècnica de València

Since the introduction of the Dependency Structure Matrix (DSM) to schedule project it has been an increased interest in its application, including applications in the construction industry and the incorporation of uncertainty in the variables. However, the developed equations include only the estimation of the earliest start and earliest finish of projects without and with natural overlap. Also, only the finish to start dependency between activities has been considered. This study aims to expand the use of DSM in project scheduling. To this end, in this paper equations to determine the early and late start/finish (and activities float) are developed. This includes projects without overlap, with natural overlap, and with forced overlap (and therefore rework). In addition, different types of dependencies between activities are considered: finish to start, start to start and finish to finish. Hypothetical examples are used to illustrate the use of equations.

Keywords: Project management; Dependency Structure Matrix; overlap; rework

SOBRE LA PROGRAMACIÓN DE PROYECTOS USANDO MED

Desde la introducción de la matriz de estructura dependiente (MED) para programar proyectos ha habido un aumento del interés por su aplicación incluyendo aplicaciones en la industria de la construcción y la incorporación de la incertidumbre en sus variables. Sin embargo, las ecuaciones desarrolladas sólo incluyen la estimación del comienzo y terminación más temprana en proyectos sin y con solape natural. Además la dependencia considerada entre las actividades ha sido del tipo fin-inicio. El objetivo del trabajo es ampliar el uso de la MED en la programación de proyectos. Para lograr esa meta, en este trabajo se presentan ecuaciones para determinar comienzos y finalizaciones más tempranas y tardías (y también las holguras) en proyectos sin solape, con solape natural, y con solape forzado (y por lo tanto rework). Además, se consideran diferentes tipos de dependencia entre actividades: fin-comienzo, comienzo-comienzo y fin-fin. Para ilustrar el uso de las ecuaciones se han utilizado ejemplos hipotéticos.

Palabras clave: Gestión de proyectos; Matriz de Estructura Dependiente; solape; retrabajo

1. Introducción

La dirección y gestión de proyectos es de gran importancia en muchas actividades industriales. Por ejemplo, en el desarrollo de nuevos productos las compañías en todos los sectores industriales se compite por obtener mejores productos en el menor tiempo posible (Chen, Ling y Chen, 2003) y la calidad de la dirección y gestión de los proyectos puede impactar en el tiempo de entrega o en los costes de desarrollo o en las decisiones adoptadas. La planificación y programación de proyectos son así acciones claves, simples en su definición, pero difíciles en la práctica. Según la American Management Association, la planificación de proyectos “consiste en determinar lo que se debe hacer, cómo se debe hacer, qué acción debe tomarse, quién es el responsable de ella y por qué” (Serpell y Alarcón, 2009), mientras que su programación es el proceso de determinar el orden secuencial de actividades, asignándoles su duración (y costos) y determinando su fecha de inicio y finalización.

La dificultad nace de la necesidad de definir simultáneamente el presupuesto del proyecto, recursos necesarios y requerimientos de materiales y considerar restricciones financieras y tecnológicas entre otras. La planificación y programación deben realizarse con visión sistémica porque los proyectos no están constituidos por actividades aisladas, sino que presentan interacción e interdependencia entre ellas.

La Norma ISO 21.500 establece las funciones y aspectos que cubre la dirección y gestión de proyectos para dirigir los procesos de dirección de proyectos: integración del proyecto, partes interesadas, definición y alcance del proyecto, recursos, plazos del proyecto, costes del proyecto, calidad del proyecto, riesgos del proyecto, adquisiciones – suministros y contratos del proyecto, información y comunicaciones en el proyecto. De estas diez grandes áreas es pertinentes comentar alguna de ellas. Tratar que el proyecto termine en el plazo establecido es el objetivo del área plazos del proyecto. Para ello es necesario la definición de las actividades, su ordenación, la estimación de la duración de las actividades, el desarrollo de las mismas y el control del cumplimiento del programa del proyecto.

Según Hameri y Heikkilä (2002) de todas las medidas de éxito de un proyecto, la medida más importante es tiempo, opinión que también ha sido compartida por varios investigadores (Ock & Han, 2010). El diagrama de Gantt es la técnica más conocida de programación de tiempos de un proyecto producto de su simplicidad, fácil implementación y uso intuitivo; pero que presenta deficiencias (no incorpora relación entre actividades y presenta una imagen estática del proyecto) que hacen que su uso sea limitado, especialmente en proyectos complejos y largos.

En cambio, el uso de diagramas de red, como lo son el método del camino crítico (CPM, Critical Path Method) y la técnica de evaluación y revisión de proyectos (PERT, Program Evaluation and Review Technique), son adecuados para proyectos complejos porque correlacionan las actividades con sus predecesoras y sucesoras. Estas técnicas, basadas en teoría de grafos, son flexibles y manejables cuando están implementadas en algún sistema informático (Aragonés et al., 1994). Sin embargo, las técnicas tradicionales de planificación y programación de proyectos, PERT y CPM, no tratan bien la interdependencia de actividades, razón por la cual en los últimos años se ha incorporado la matriz de estructura dependiente (MED) como una herramienta para programar actividades.

La matriz de estructura dependiente (MED)¹, introducida por Steward (1965), ha demostrado ser una herramienta potente para gestionar proyectos complejos porque con ella se puede representar adecuadamente la interrelación y dependencia entre las diferentes actividades

¹ En inglés se denomina dependency structure matrix (DSM), también conocida como design structure matrix, dependency source matrix, dependency structure method.

que conforman un proyecto. La MED ha sido aplicada ampliamente incluyendo desarrollo de productos, planificación de proyectos, ingeniería de sistemas y diseño organizacional (Browning, 2001). Por ejemplo, Browning (1998) usó la MED para calcular el camino crítico usando la duración de las actividades como elementos de la matriz. La Tabla 1 muestra ejemplos de aplicación de la MED en dirección y gestión de proyectos, desarrollo de productos, diseño de productos, y desarrollo de software. Según la página web de la comunidad MED, www.dsmweb.org², la MED es una herramienta simple para realizar análisis y gestión de sistemas complejos.

Permite al usuario modelar, visualizar y analizar las dependencias entre las entidades de cualquier sistema y obtener sugerencias para la mejora o la síntesis de un sistema. Tal sistema puede ser por ejemplo la arquitectura de un producto o un proceso de diseño de ingeniería; también, por ejemplo, la organización de una empresa o de un mercado puede tomar forma como un sistema complejo y, a menudo merecer una mirada más cercana en su estructura.

Como una herramienta para el análisis de sistemas, la MED ofrece una representación compacta y clara de un sistema complejo y un método para capturar las interacciones / interdependencias / interfaces entre los elementos del sistema (es decir, los subsistemas y módulos). Como herramienta de gestión, la MED se aplica con frecuencia en la gestión de proyectos, y proporciona una representación del proyecto que permite la retroalimentación y las dependencias cíclicas de actividades. Esto es extremadamente importante ya que la mayoría de las aplicaciones de ingeniería exhiben esta propiedad cíclica. Como tal, esta representación a menudo resulta en un programa de ejecución mejorado y más realista para las actividades de diseño correspondientes.

Considerando estos atributos, Maheswari y Varghese (2005) introdujeron el uso de la MED para realizar programación de actividades y determinar la duración de proyectos. Ellos consideraron aspectos importantes de la interrelación y dependencia de actividades como son los tiempos de comunicación y los niveles de superposición natural entre las actividades.

La programación de actividades usando la MED ha tenido avances, pero no los suficientes como para integrarse como una herramienta complementaria a la dirección y gestión de proyectos usando MED. Los avances se pueden resumir en el desarrollo de algoritmos que permiten determinar la duración de proyectos incluyendo la interdependencia entre las actividades, la incorporación de los tiempos de comunicación, y la posibilidad de considerar solape natural entre actividades. Adicionalmente, varios trabajos han considerado la incertidumbre en la programación usando la MED, esos trabajos incluyen la aplicación de las teorías gris (Gálvez, Capuz-Rizo & Ordieres, 2012), difusa o probabilística (Gálvez & Capuz-Rizo, 2015). Sin embargo, las ecuaciones desarrolladas sólo incluyen la estimación del comienzo y terminación más temprana en proyectos sin y con solape natural. Además la dependencia considerada entre las actividades ha sido del tipo fin-inicio.

Este trabajo busca ampliar el uso de la MED en la programación de proyectos. Específicamente, en este trabajo se presentan ecuaciones para determinar comienzos y finalizaciones más tempranas y tardías (y también las holguras) en proyectos sin, con solape natural, y con solape forzado (y por lo tanto *rework*). Además, se consideran diferentes tipos de dependencia entre actividades: fin-comienzo, comienzo-comienzo y fin-fin. Ejemplos hipotéticos son usados para ilustrar el uso de las ecuaciones.

El documento es organizado en cuatro secciones, siendo la introducción la primera, en la segunda sección se introduce la MED y se presentan diferentes tipos de dependencia entre

² Esta página web presenta amplia documentación, tutoriales, usos industriales de la MED, software y herramientas, y eventos sobre MED.

actividades, la tercera sección presenta actividades con solape natural y forzado, finalmente la sección cuarta presenta las conclusiones.

Tabla 1. Ejemplos de aplicación de la MED.

Campo de Aplicación	Descripción	Referencia
Gestión en ingeniería de diseño	Se presenta un procedimiento para modelar, analizar y administrar las interacciones presentes en el proceso de diseño	Yassine, Falkenburg & Chelst. (1999)
Programación de actividades	Se presenta un marco de referencia para el desarrollo de nuevos productos	Chen, Ling & Chen (2003)
Desarrollo de productos	La MED es utilizada para analizar y representar la dependencia entre atributos de innovación.	Bilalis et al. (2004)
Ingeniería de sistemas	La MED es utilizada para describir la arquitectura de productos	Sharman y Yassine (2004)
Programación de actividades	Se introduce los tiempos de comunicación y factores de solape.	Maheswari y Varghese (2005)
Diseño de edificios	Se introduce la MED paramétrica como una herramienta para modelación y análisis de sistemas.	Pektaş y Pultar (2006)
Diseño de Productos	La MED es utilizada para capturar y administrar conocimiento.	Tang et al. (2010)
Programación de actividades	La teoría de lógica difusa es utilizada para representar la incertidumbre.	Shi y Blomquist (2012)
Programación de actividades	Se presenta un algoritmo para programar actividades en el mejor tiempo posible usando solape	Srour et al. (2013)
Programación de actividades	La estrategia óptima de solape se realiza utilizando la matriz estratégica de solape y algoritmo genético.	Hossain y Chua (2014)
Diseño y organización	Se utiliza MED para representar arquitecturas complejas.	Sosa, Eppinger y Rowles. (2004)
Desarrollo de software	Se propone una MED enriquecida (e-MED), que ofrece pequeñas-múltiples vistas y micro-macro-lecturas, añadiendo más información en cada celda de la matriz.	Laval y Ducasse (2014)
Programación de actividades	Se propone un modelo con MED de dos y tres actividades para alcanzar duración mínima de un proyecto.	Ummer et al. (2014)
Diseño y desarrollo de productos	La MED es usada para representar relaciones entre tareas en equipos de trabajo multidisciplinarios	Chen y Lin (2003)
Desarrollo de proyectos	Se presenta un método que se basa en la MED para optimizar la estructura de desglose del trabajo en proyectos de la construcción naval.	Ren, Cao y Han (2015)

2. Matriz de Estructura Dependiente

La MED presenta la relación entre los componentes de un sistema en un formato que facilita el análisis visual y los cálculos matemáticos. La MED es una matriz cuadrada donde cada fila y columna representa un componente de un sistema. Los elementos fuera de la diagonal indican la dependencia de un elemento con respecto a otros componentes. La lectura por columna se puede interpretar como “información enviada a”, mientras que la lectura por filas como “información recibida de”. En otras palabras, la lectura por columna indica los elementos que dependen del elemento representado por la columna, y la lectura por filas indican los elementos de los cuales depende el elemento representado por la fila (Browning, 2001).

Por ejemplo, la Figura 1 muestra una MED de un sistema con cinco elementos (A, B, C, D y E), en donde el elemento A envía información a los elementos B y C, y en donde el elemento E depende o recibe información de los elementos C y D. Desde el punto de vista de programación de actividades, cada fila o columna de la matriz corresponde a una actividad y los valores en la diagonal representan la duración de las actividades.

Se pueden identificar tres tipos de configuraciones: actividades paralelas, actividades secuenciales y actividades acopladas. Cuando las actividades son paralelas, ellas no interactúan como es el caso de las actividades B y C. Por otra parte, si son secuenciales, una actividad influye en el comportamiento o decisiones de otra actividad como es el caso de la actividad A que influye en la actividad B. Cuando las actividades están acopladas, el flujo de información es en ambas direcciones entre las actividades, es decir una actividad influye sobre otra y viceversa. Esto se observa por marcas sobre la diagonal en la MED, aunque no mostradas en la Figura 1, la MED también puede representar actividades acopladas.

La Figura 2 muestra la secuencia de las actividades y la duración del proyecto basado en la MED de la Figura 1. En lo siguiente se asume que la MED se encuentra particionada, es decir sólo marcas bajo la diagonal. Si un grupo de actividades no se pueden fraccionar (actividades acopladas), ese grupo de actividades se debe considerar como una sola actividad.

3. Uso de la MED con Diferentes Tipos de Dependencia

El proceso de planificación de un proyecto consta de seis operaciones: especificar sus objetivos, estructurar el proyecto en actividades y tareas, establecer la secuencia (prioridades y dependencia) entre tareas, estimar la duración de las tareas, definir los recursos disponibles, y definir el presupuesto admisible (Gómez-Senent, Chiner & Capuz-Rizo, 1994). Estas operaciones permiten una educada realización del proyecto, planificando las actividades comprometidas, ordenándolas y definiendo sus relaciones de dependencia y de prioridad, así como su distribución en el tiempo.

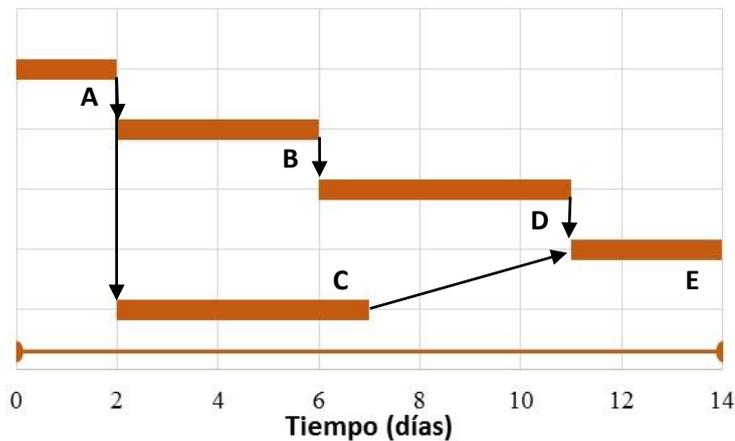
Una vez establecidos los alcances del proyecto, las fases del proyecto se descomponen en actividades y tareas, las cuales deben tener criterios claros de inicio y término. Las precedencias y dependencias entre tareas usualmente son de tipo fin-inicio, es decir una tarea no puede empezar hasta que ha acabado la precedente, o de tipo comienzo-comienzo (fin-fin) en donde una tarea no puede empezar (terminar) hasta que empiece (termine) otra tarea.

La duración de la tarea es la estimación del tiempo necesario para completarla. Para estimar este tiempo se asume la siguiente hipótesis. Se dispone de los recursos que de forma normal serían necesarios para desarrollar la actividad, ya sean medios materiales y humanos, disponibles en la organización que desarrolla el proyecto.

Figura 1: Matriz de estructura dependiente

	A	B	C	D	E
A	2				
B	X	4			
C	X		5		
D		X		5	
E			X	X	3

Figura 2: Programación de actividades de la MED de la figura 1 utilizando una representación Gantt.



La versión actual de la MED sólo permite precedencias y dependencias entre tareas del tipo fin-inicio, es decir una tarea no puede empezar hasta que ha acabado la precedente. La figura 3 muestra otros tipos de dependencia. En la figura 3 la actividad j es dependiente de las actividades i . En la Figura 3a la dependencia es de tipo fin-comienzo, así el comienzo más temprano de la actividad j $((ES)_j)$ corresponde al valor máximo de las finalización más temprana de las actividades antecesoras i $((EF)_i)$. En forma similar la figura 3c muestra que el comienzo más temprano de la actividad j corresponde al valor máximo de los comienzos más temprana de las actividades antecesoras i . Cuando la relación es del tipo fin-fin, la finalización más temprana de la actividad i será igual al valor máximo de las finalizaciones más tempranas de las actividades antecesoras i . Luego, el comienzo más temprano de la actividad j será igual al máximo de las finalizaciones más temprana de las actividades antecesoras i menos la duración de la actividad j (A_{jj}) .

Luego la duración de proyecto considerando sólo el tiempo requerido para realizar las actividades, duración convencional, puede ser determinado usando la MED usando las ecuaciones 1 a 6.

$$(EF)_i = (ES)_i + A_{ii} \quad 0 < i \leq n \quad (1)$$

$$(ES)_j = \text{Max} \left\{ \max_{i \in F-C} [(EF)_i], \max_{i \in C-C} [(ES)_i], \max_{i \in F-F} [(EF)_i - A_{jj}] \right\} \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (2)$$

$$P = \text{Max} [(EF)_j] \quad 0 < j \leq n \quad (3)$$

$$(LS)_i = (LF)_i - A_{ii} \quad 0 < i \leq n \quad (4)$$

$$(LF)_i = \text{Min} \left\{ \min_{j \in F-C} [(LS)_j], \min_{j \in C-C} [(LS)_j + A_{ij}], \min_{j \in F-F} [(LF)_j] \right\} \quad 0 < i \leq n, \quad 0 < j \leq n \quad (5)$$

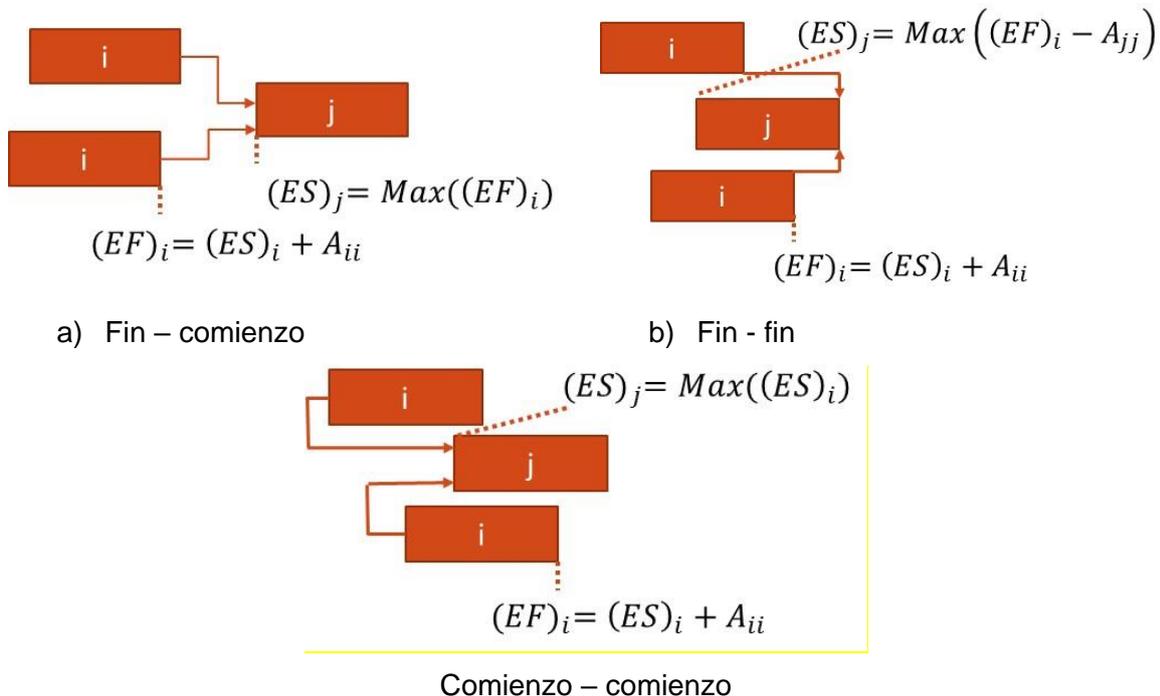
$$S_i = LS_i - ES_i \quad 0 < i \leq n \quad (6)$$

Donde P es la duración convencional del proyecto, A_{ii} son los valores de la diagonal de la MED que incluye la duración de cada actividad. El número de actividades es representado por n , i representa a todas las actividades previas a la actividad j , y j es la actividad actualmente seleccionada desde la MED. $(ES)_j$, $(EF)_j$, $(LS)_j$, $(LF)_j$, y S_j representan el comienzo más temprano, la finalización más temprana, el comienzo más tardío, la finalización más tardía, y la holgura de la actividad j . Note que si S_j es cero entonces j es una actividad crítica. Adicionalmente, $j \in F - C$, $j \in C - C$, y $j \in F - F$ indica que la relación entre las actividades i y j es de tipo fin-comienzo, comienzo-comienzo, y fin-fin respectivamente.

La ecuación 1 indica simplemente que la finalización más temprana es igual al comienzo más temprano más la duración de la actividad. La ecuación 2 establece que el comienzo más temprano es el máximo de los comienzos más tempranos según el tipo de dependencia entre las actividades ilustradas en la figura 3. La duración del proyecto es el mayor valor de las finalizaciones más tempranas de todas las actividades (ver ecuación 3).

Para determinar las finalizaciones y comienzos más tardíos se realiza el proceso inverso partiendo desde la última actividad, luego las ecuaciones 4 y 5 son la versión inversa de las ecuaciones 1 y 2. La holgura de la actividad es simplemente la diferencia entre el comienzo más tardío y el comienzo más temprano, es obvio que se puede también calcular con la finalización y comienzo más tardío.

Figura 3. Diferentes tipos de dependencia entre actividades



4. Programación de Proyectos con Solape

4.1 Programación de Proyectos con Solape Natural

Cuando una actividad depende de otra, ella puede programarse con o sin solape. La programación sin solape entre actividades es de interés porque significan programaciones con mínimo riesgo. La programación con solape entre actividades es de interés porque permite reducir la duración de proyectos (Kirshnan, Eppinger & Whitney, 1997). Cuando existe solape o solapamiento se asume que la actividad aguas abajo puede iniciarse antes de recibir información de la actividad aguas arriba y que esta actividad puede enviar información antes que su finalización (Wang & Lin, 2009). Maheswari y Varghese (2005) introdujeron dos índices de solape para representar el solapamiento natural entre actividades usando la MED.

El primero es definido como la razón entre el tiempo necesario para enviar información y el tiempo de duración de la actividad aguas arriba. El segundo se define como la razón entre el tiempo necesario para recibir información y el tiempo de duración de la actividad aguas abajo. Estos índices están representadas por las razones p_1/p_2 y s_1/s_2 en la Figura 4. Para determinar la duración del proyecto con solape natural, se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$(ES)_j = \text{Max}[(ES)_i + (B_{ji} \times B_{ii}) - (C_{ji} \times C_{jj})] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (7)$$

$$(EF)_j = (ES)_j + B_{jj} \quad 0 < j \leq n \quad (8)$$

$$P = \text{Max}[(EF)_j] \quad 0 < j \leq n \quad (9)$$

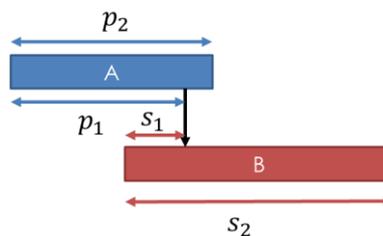
$$(LS)_i = \text{Min}[(LS)_j - (B_{ji} \times B_{ii}) + (C_{ji} \times C_{jj})] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (10)$$

$$(LF)_j = (LS)_j + B_{jj} \quad 0 < j \leq n \quad (11)$$

Donde B_{ji} y C_{ji} son las matrices que contiene los valores de las razones p_1/p_2 y s_1/s_2 entre las actividades j e i . Los valores de la diagonal de las matrices, B_{ii} y C_{ii} , corresponden a la duración de la actividad i . El significado de los otros parámetros se ha indicado anteriormente.

Estas ecuaciones fueron introducidas por Maheswari y Varghese (2005) para $(ES)_j$, y $(EF)_j$, aquí también se ofrecen las ecuaciones para $(LS)_j$, $(LF)_j$, y S_j . Sólo se han considerado dependencias fin-comienzo.

Figura 4: Representación gráfica de las razones de solape.



4.2 Programación de Proyectos con Solape Forzado

La mayoría de los casos de solape corresponden a solape forzado. Muchos investigadores han estudiado la correlación entre el “grado de solape” y la “cantidad de *rework*” y se ha aceptado que la probabilidad de *rework* aumenta a medida que el “grado de solape aumenta”.

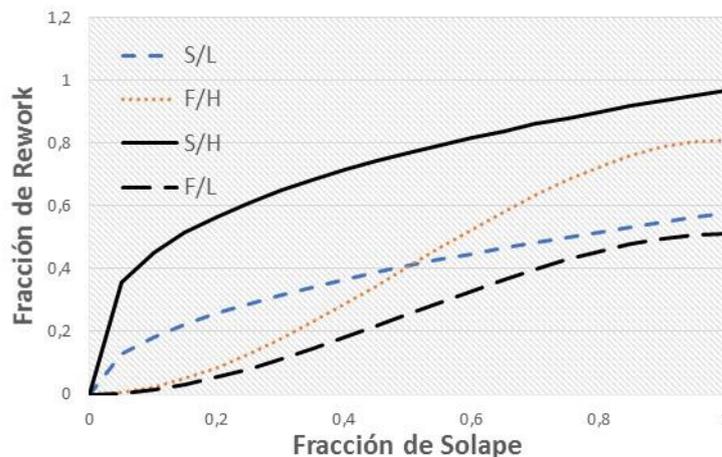
Las actividades son caracterizadas por dos atributos: evolución y sensibilidad. La evolución mide la velocidad de producción de una actividad predecesora, diferenciando actividades con alta producción en la parte inicial de la actividad (rápida) de aquellas con alta producción al final de la actividad (lenta). La sensibilidad representa la respuesta de la actividad sucesora a los cambios de su predecesora. En otras palabras, la sensibilidad indica la probabilidad de *rework*.

Para programar adecuadamente las actividades con solape es deseable incluir la evolución de la actividad predecesora y la sensibilidad de la actividad sucesora. Aquí, se asume que la probabilidad de *rework* entre dos actividades j,i (r_{ji}) se puede calcular dependiendo del tipo de relación "sensibilidad/evolución". Si la sensibilidad se puede caracterizar como alta (H) o baja (L) y la evolución como rápida (F) y lenta (S), se pueden identificar cuatro tipos de funciones: L/S, H/S, L/F, y H/F.

Por ejemplo, la figura 5 muestra la cantidad de *rework* como una función de la fracción de solape para los cuatro tipos de relaciones antes identificados basado en las funciones dadas por Lim et al. (2014).

Cuando la actividad predecesora tiene una lenta evolución y la actividad sucesora posee una alta sensibilidad (S/H) se obtiene la mayor cantidad de *rework*, mientras que la menor cantidad de *rework* se puede observar cuando la actividad predecesora tiene una rápida evolución y la actividad sucesora posee una baja sensibilidad (F/L).

Figura 5: Funciones de probabilidad de *rework* según tipo de relación entre actividades predecesora y sucesora.



Para utilizar la MED se introducen dos matrices, una con los factores de solape (B) y otra con los factores de *rework* (R_{ji}). El factor de solape es definido como la razón entre el tiempo necesario para enviar información y el tiempo de duración de la actividad aguas arriba. El factor de *rework* se define como la razón entre el tiempo de *rework* y el tiempo de duración de la actividad aguas abajo. Estos índices están representadas por las razones p_1/p_2 y r_1/r_2 en la Figura 6. Para determinar la duración del proyecto con solape forzado, las siguientes ecuaciones se pueden utilizar:

$$(ES)_j = \text{Max}[(ES)_i + B_{ji} \times B_{ii}] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (12)$$

$$(EF)_j = \text{max}_i [(ES)_j + R_{jj} + R_{ji}R_{jj}] \quad 0 < j \leq n \quad (13)$$

$$P = \text{Max}[(EF)_j] \quad 0 < j \leq n \quad (14)$$

$$(LS)_i = \text{Min}[(LS)_j - B_{ji} \times B_{ii}] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (15)$$

$$(LF)_j = \text{min}_i[(LS)_j + R_{jj} + R_{ji}R_{jj}] \quad 0 < j \leq n \quad (16)$$

Los valores de la diagonal de las matrices, B_{ii} y R_{ii} , corresponden a la duración de la actividad i . La ecuación 12 indica que el comienzo más temprano de una actividad es el máximo valor del comienzo más temprano más el tiempo necesario para enviar información de la de las actividades predecesoras (ver Figura 6). Por otra parte, la finalización más temprana es igual al comienzo más temprano más la duración de la actividad y más el *rework* necesario producto del solape (Figura 6).

Estas ecuaciones suponen que el factor de solape no es afectado por el nivel de *rework* que eventualmente pudiera tener la actividad predecesora, y por tanto subestima la duración del proyecto. Sin embargo, estas ecuaciones también asumen que el *rework* de una actividad sucesora es dependiente del valor máximo de todas los *rework* que se pueden generar, y por tanto existe una posibilidad de sobreestimar la duración del proyecto.

5. Ejemplos de Programación de Proyectos Usando la MED

El objetivo de esta sección es ilustrar el uso de las ecuaciones generadas. Por motivos de espacio aquí se muestra sólo la determinación de los inicios y finalizaciones más tempranas. El primer ejemplo considera un proyecto de cuatro actividades como se muestra en la figura 7a. La matriz muestra en la diagonal la duración de cada actividad y los valores fuera de la diagonal muestra la dependencia. Valores de 1, 2 y 3 indican dependencias del tipo comienzo-comienzo, fin-comienzo y fin-fin respectivamente. Primero se determinan los comienzos y finalizaciones más tempranas usando las ecuaciones 1 y 2 considerando su tipo de dependencia como se muestra en la Figura 7b. La duración del proyecto es el mayor valor de las finalizaciones más tempranas, es decir 7.

Figura 6: Definición de factores de solape (B_{ji}) y factores de *rework* (R_{ji}).

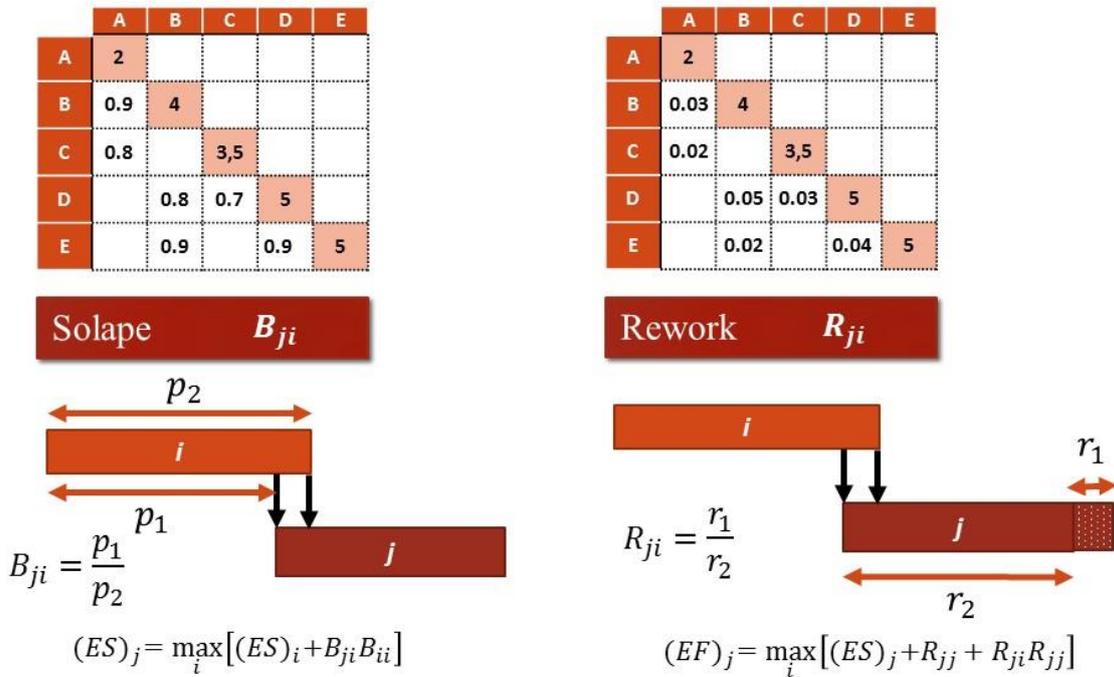


Figura 7: Primer ejemplo

	A	B	C	D
A	2			
B	1	4		
C	2		3,5	
D	2	1	3	5

$$(ES)_A = 0$$

$$(EF)_A = (ES)_A + A_{AA} = 0 + 2 = 2$$

$$(ES)_B = \text{Max} \left\{ \max_{i \in C-C} [(ES)_A] \right\} = 0$$

$$(EF)_B = (ES)_B + A_{BB} = 0 + 4 = 4$$

$$(ES)_C = \text{Max} \left\{ \max_{i \in F-C} [(EF)_A] \right\} = 2$$

$$(EF)_C = (ES)_C + A_{CC} = 2 + 3,5 = 5,5$$

$$(ES)_D = \text{Max} \left\{ \max_{i \in F-C} [(EF)_A], \max_{i \in C-C} [(ES)_B], \max_{i \in F-F} [(EF)_C - A_{DD}] \right\}$$

$$(ES)_D = \text{Max} \{ 2; 0; 5,5 - 5 \} = 2$$

$$(EF)_D = (ES)_D + A_{DD} = 2 + 5 = 7$$

a) MED

b) Cálculos

Un segundo ejemplo considera la estimación de duración de proyecto con solape forzado para el proyecto de la Figura 6. Primero se determinan los comienzos y finalizaciones más tempranas usando las ecuaciones 12 y 13. Se inicia con la actividad A, considerando que su inicio más temprano es cero. Es decir $(ES)_A = 0$. Luego se determina $(EF)_A = \max[(ES)_A + R_{AA}] = 0 + 2 = 2$. En el caso de la actividad B y C, ambas dependen de A, luego el procedimiento de cálculo es similar en ambos casos:

$$(ES)_B = \max[(ES)_A + B_{BA} \times B_{AA}] = \max[0 + 0,9 \times 2] = 1,8$$

$$(EF)_B = \max_A [(ES)_B + R_{BB} + R_{BA} R_{BB}] = \max_A [1,8 + 4 + 0,03 \times 4] = 5,92$$

$$(ES)_C = \max[(ES)_A + B_{CA} \times B_{AA}] = \max[0 + 0,8 \times 2] = 1,6$$

$$(EF)_C = \max_A [(ES)_C + R_{CC} + R_{CA} R_{CC}] = \max_A [1,6 + 3,5 + 0,02 \times 3,5] = 5,17$$

En el caso de las actividades D y E ambas dependen de dos actividades, razón por la cual se seleccionan los valores máximos, por ejemplo, para la actividad D

$$(ES)_D = \max_{B,C} [(ES)_B + B_{DB} \times B_{BB}; (ES)_C + B_{DC} \times B_{CC}] = \max[1,8 + 0,8 \times 4; 1,6 + 0,7 \times 3,5] = 5,0$$

$$(EF)_D = \max_{B,C} [(ES)_D + R_{DD} + R_{DB} R_{DD}; (ES)_D + R_{DD} + R_{DC} R_{DD}] = \max[10,25; 10,15] = 10,15$$

Para la actividad E, los valores obtenidos son $(ES)_D = 9,5$ y $(EF)_D = 14,7$. Luego la duración del proyecto es el valor mayor de todos los $(EF)_D$, es decir 14,7.

6. Conclusiones

Se ha ampliado el uso de la MED en la programación de proyectos, incorporando solape forzado y diferentes tipos de dependencia entre actividades. Ejemplos han sido utilizados para ejemplificar el uso de las ecuaciones. Se ha demostrado que el uso de la MED en la programación de actividades se puede ampliar para incluir diferentes tipos de dependencia entre actividades y para incluir solape natural y forzado.

Así mismo se ha demostrado que, además de determinar los comienzos y finalizaciones más tempranos, también se puede determinar los comienzos y finalizaciones más tardías. Esto último permite determinar las holguras y el camino crítico.

La estructura matricial de la MED permite incluir fácilmente relaciones entre actividades, como por ejemplo el rework, y el uso de varias MED permite combinar varios tipos de dependencia e información. Así es fácil imaginar que proyectos con solape natural y forzados pueden ser representados usando la MED, combinando ambas representaciones y desarrollando las ecuaciones necesarias. Desde esa perspectiva, este trabajo introduce formas de cómo se pueden desarrollar nuevas ecuaciones según el tipo de información y dependencia presentes en un proyecto específico.

Referencias

- Aragonés P., Capuz-Rizo S., Chiner M., Gómez-Senent, E. (1994). Análisis de redes PERT mediante superficies de respuesta, *Actas del I Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, (415-431) Universidad de Oviedo, Oviedo.
- Bilalis N., Maravelakis E, Antoniadis A., Moustakis V. (2004). Mapping product innovation profile to product development activities – the I-DSM tool, *Engineering Management Conference, 2004. Proceedings*. 2004 IEEE International 3, 1018-1022.
- Browning TR. (1998). Use of dependency structure matrices for product development cycle time reduction. In: *Proceedings of the fifth ISPE international conference on concurrent engineering: research and applications*, Tokyo, Japan.
- Browning, TR. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering management* 48 (3), 292-306.
- Chen CH., Ling SF., Chen W. (2003). Project scheduling for collaborative product development using DSM, *International Journal of Project Management*, 21, 291-299.
- Chen S., Lin L. (2003). Decomposition of interdependent task group for concurrent engineering, *Computers & Industrial Engineering* 44, 435-459.
- Gálvez ED., Capuz-Rizo SF, Ordieres JB. (2012). Study of the uncertainty of task programming using the dependency structure matrix, *Información Tecnológica* 23(1) 19-34.
- Gálvez ED., Capuz-Rizo SF. (2015), Assessment of global sensitivity analysis methods for project scheduling, *Computers & Industrial Engineering* 93,110-120
- Gomez-Senent E., Chiner M., Capuz-Rizo SF. (1994). Dirección y Gestión de Proyectos, Serv. Publ. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España
- Hameri AP., Heikkilä J. (2002). Improving efficiency: time-critical interfacing of project tasks, *International Journal of Project Management*, 20, 143-153.
- Hossain MA., Chua, DKH. (2014). Overlapping design and construction activities and an optimization approach to minimize rework, *International Journal of Project Management*, 32, 983-994.
- Kirshnan V., Eppinger SD., Whitney DE. (1997). A model-based framework to overlap product development activities, *Management Science*, 43(4) 437-451.
- Laval J., Ducasse S. (2014). Resolving cyclic dependencies between packages with enriched dependency structural matrix, *Software-Practice & Experience* 44(2), 235-257.
- Lim, T.C., Yi, D., Lee,D., Arditi, D. (2014) Concurrent construction scheduling simulation algorithm, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29, 449-463.
- Maheswari J.U., Varghese, K. (2005). Project scheduling using dependency structure matrix, *International Journal of Project Management* 23 (3) 223-230.

- Ock, J.H., Han, S. H. (2010) measuring risk-associated activity's duration: A fuzzy set theory application, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(5), 663-671.
- Pektaş S.T., Pultar, M. (2006). Modelling detailed information flows in building design with the parametric-based design structure matrix, *Design Studies* 27, 99-122.
- Ren, N., Cao, M., Han, B. (2015). Research on Shipbuilding Project WBS Optimization Based on DSM, *Journal of Coastal Research* 73, 647-651
- Serpell A., Alarcón, L.F. (2009), Planificación y Control de proyectos, Pontificia Universidad Católica de Chile, cuarta edición, Santiago, Chile.
- Sharman D.M., Yassine, A.A. (2004). Characterizing complex product architectures, *Systems Engineering* 7(1), 35-60.
- Shi, Q., Blomquist, T. (2012). A new approach for project scheduling using fuzzy dependency structure matrix, *International Journal of Project Management* 30, 503-510.
- Sosa M.E., Eppinger, S. D., Rowles, C.M. (2004). The Misalignment of Product Architecture and Organizational Structure in Complex Product Development, *Management Science*, 50(12) 1674 – 1689.
- Srour, I.M., Abdul-Malak, M.U., Yessine, A.A., & Ramadan, M. (2013). A methodology for scheduling overlapped design activities based on dependency information, *Automation in Construction* 29, 1-11.
- Steward, D.V. (1965). Partitioning and tearing systems of equations, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics: Series B, numerical analysis*, 2(2), 345-365.
- Tang D., Zhu, R., Tang, J., Xu, R., & He, R. (2010). Product design knowledge management based on design structure matrix, *Advanced Engineering Informatics* 24, 159-166.
- Ummer N., Maheswari U., Matsagar V. A., Varghese K. (2014). Factors Influencing Design Iteration with a Focus on Project Duration, *Journal of Management in Engineering*, 30 (1), 127-130.
- Wang J., Lin Y.I. (2009) An overlapping process model to assess scheduling risk for new product development, *Computers & Industrial Engineering* 57, 460-474.
- Yassine A., Falkenburg D., Chelst, K. (1999). Engineering design management: An information structure approach, *International Journal of Production Research* 37(13), 2957-2975.