

## Estudio de la Incertidumbre en la Programación de Actividades usando la Matriz de Estructura Dependiente

Edelmira D. Gálvez<sup>(1)</sup>, Salvador F. Capuz-Rizo<sup>(2)</sup> y Joaquin B. Ordieres<sup>(3)</sup>

(1) Depto. de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Católica del Norte, Av. Angamos 0610, Antofagasta-Chile (e-mail: egalvez@ucn.cl)

(2) Depto. de Proyectos de Ingeniería, Universidad Politécnica de Valencia, Cno. de Vera s/n, E-46020 Valencia-España (e-mail: scapuz@dpi.upv.es)

(3) E.T.S. Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, C/José Gutiérrez Abascal 2, E-28006 Madrid-España (e-mail: j.ordieres@upm.es)

*Recibido Abr. 20, 2011; Aceptado Jun. 28, 2011; Versión Final recibida Jul. 16, 2011*

---

### Resumen

Se presenta un estudio sobre el efecto de la incertidumbre en la programación de actividades de proyectos usando la matriz de estructura dependiente (DSM) y la teoría gris. Se aplica la teoría gris para representar la incertidumbre en la estimación del tiempo de duración de proyectos, desarrollando las ecuaciones necesarias para determinar el tiempo convencional gris, el tiempo normal gris y el tiempo normal gris con superposición natural. Con base en el estudio se concluye que la aplicación de la teoría de gris a la DSM permite: i) considerar la incertidumbre en la programación del proyecto; ii) identificar las etapas más críticas; iii) analizar el efecto de la incertidumbre de cada etapa en la duración total del proyecto; y iv) comparar diferentes estrategias de programación.

*Palabras clave: DSM, planificación de proyectos, administración de proyectos, teoría gris, incertidumbre*

## Study of the Uncertainty of Task Programming using the Dependency Structure Matrix

### Abstract

A study about the effect of uncertainty on the planning of project activities using the dependency structure matrix (DSM) and grey theory. The grey theory is applied to represent the uncertainty in estimating project extension. As a result, the equations to determine the grey conventional time, the grey normal time and the grey normal time with natural overlap were developed. Based on the case studies it is concluded that the application of the grey theory to the DSM allows: considering the uncertainty in project planning; ii) identifying the most critical stages; iii) analyzing the effect of the uncertainty of each stage in the total project duration; and iv) comparing different programming strategies.

*Keywords: DSM, project scheduling, project managing, grey theory, uncertainty*

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de estrategias para la innovación en nuevos productos se ha transformado en un elemento central de muchas corporaciones como una respuesta a los rápidos avances tecnológicos, la globalización de los mercados, y el aumento de la competencia interna y externa (Tang et al., 2010). Uno de los factores importantes en el desarrollo de nuevos productos es la velocidad de llegada al mercado. Así la habilidad para acelerar el proceso y anticiparse a la competencia es central para el éxito. Sin embargo, esto no debe ser a costa de no administrar adecuadamente el proyecto. Por lo tanto, es necesario contar con herramientas que integren el análisis y la programación de proyectos. Una herramienta que permite el análisis de proyectos y productos debe ser una que permita descomponer e integrar los diferentes elementos del proyecto o producto, es decir, que permita el análisis de sistemas. Así la complejidad directiva se simplifica descomponiendo el proceso del proyecto en tareas más pequeñas, identificando las relaciones entre ellas, conociendo su impacto sobre el proyecto, y asignando recursos a éstas tareas individuales (Browning, 2001, Cruz-Machado y Rosa, 2007). La matriz de estructura dependiente (DSM, del inglés desing structure matrix) es una herramienta ampliamente utilizada con esos fines (Browning, 2001). La DSM muestra las relaciones entre los componentes de un sistema en forma compacta, visual y en un formato adecuado para el análisis. La DSM ha sido aplicada al análisis de una gran cantidad de sistemas (Cronemyr et al., 2001, Smith y Morrow, 1999).

Por otra parte la programación de proyectos se concentra en la localización de recursos y la programación de actividades con el objetivo de optimizar alguna medida de desempeño (generalmente la duración del proyecto). Una de las herramientas convencionales para programación es el PERT/CPM (Project evaluation and review technique/Critical path methods), la cual identifica las actividades de la "ruta crítica", la duración del proyecto y la holgura disponibles en las actividades que no están en la ruta crítica. Sin embargo, el PERT/CPM no es adecuado para análisis del proyecto pues no puede modelar flujo de información ni actividades interdependientes (Mahaswari y Varghese, 2005a). Producto de lo anterior han existido esfuerzos recientes para incluir programación de proyectos dentro de la DSM con el objetivo de contar con una herramienta que sirva para los dos objetivos: análisis y programación de proyectos (Maheswari y Varghese, 2005b). Investigadores han demostrado que la DSM es una herramienta poderosa en la planificación de secuencias de actividades puesto que representa las interacciones entre las actividades y porque permite identificar y administrar los intercambios de información (Yassine et al, 1999; Eppinger et al., 1994; Chen et al., 2003). Por otro lado, la DSM ha sido aplicada en planificación y programación de actividades, calculando caminos críticos asignándoles "cantidad de esfuerzo/trabajo realizado" como duración de las actividades. Recientemente Maheswari y Varghese (2005b), incluyeron los "tiempos de comunicación" y la superposición natural para estimar la duración de los proyectos. El trabajo realizado por Maheswari y Varghese amplía el uso de la matriz de estructura dependiente para determinar el tiempo de duración de proyecto considerando superposición natural y considerando el tiempo de comunicación entre actividades.

Como es conocido, las actividades del proyecto están sujetas a una cantidad considerable de incertidumbres (Herroelen y Leus, 2005; Perminova et al., 2007) que puede originar varios cambios en la programación. Esta incertidumbre se origina por varias fuentes: las actividades pueden tomar más o menos tiempos del originalmente estimado, los recursos pueden estar no disponibles, el material puede llegar antes de lo programado, actividades pueden ser introducidas/eliminadas, condiciones climáticas pueden causar atrasos, entre otras causas. Estos cambios o incertidumbres pueden causar atrasos en la duración del proyecto, aumentar los inventarios o requerir mayor trabajo significando mayores costos a los planificados. Por lo tanto, la validación de los métodos determinísticos para la programación han sido cuestionados (Goldratt, 1997). Así, una de las limitaciones del trabajo desarrollado por Maheswari y Verhese se encuentra en las dificultades para definir en forma determinística los tiempos de cada actividad, los tiempos de comunicación y los niveles de superposición. Varias investigaciones se han realizado para considerar la incertidumbre en la programación de proyectos entre ellas programación reactiva, programación estocástica y programación difusa (Herroelen y Leus, 2005). Sin embargo, todos esos métodos asumen que la información relacionada con la programación está completamente

disponible o se puede generar fácilmente. Una teoría para considerar incertidumbre y aún no aplicada a la programación de proyectos es la teoría de sistemas grises (Deng, 1982), la cual puede ser aplicada cuando la información es incompleta e incierta. Una de las ventajas de la teoría gris es su fácil implementación.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para la programación de proyectos bajo incertidumbre que permita el análisis de sistemas utilizando la DSM. Para ello la teoría de sistemas grises es aplicada a la programación de proyectos con la matriz de estructura dependiente. Específicamente, en este trabajo se propone una metodología que incorpora la incertidumbre, usando números grises, en los valores de los tiempos de cada actividad, los tiempos de comunicación y los niveles de superposición para determinar los tiempos de duración del proyecto y su incertidumbre. Además, se entrega una forma de evaluar el efecto de la incertidumbre de una actividad o tarea particular en la incertidumbre total del proyecto.

## ANTECEDENTES

### *Breve descripción sobre DSM*

La matriz de estructura dependiente muestra la relación entre los componentes de un sistema en un formato que facilita el análisis visual. La DSM es una matriz cuadrada con igual cantidad de filas y columnas, cuyos elementos fuera de la diagonal significa la dependencia de un elemento a otro. La lectura por columna se entiende como “da información a” y por filas como “necesita información desde”. O dicho de otra forma leyendo por columnas podemos ver las entradas y leyendo por filas podemos ver las dependencias (Browning, 2001). El proceso de arreglar el orden de las actividades moviendo ya sea una columna o una fila, en cualquier dirección (izquierda/derecha y arriba/abajo), con el objetivo de obtener una matriz que no tiene marca sobre la diagonal o las marcas están cerca de la diagonal se conoce como particionamiento. En este trabajo se asume, por simplicidad, que no hay marcas sobre la diagonal después del particionamiento, lo cual implica que no hay interdependencia de actividades o lazos. La DSM a sido aplicada a una gran cantidad de situaciones incluyendo la construcción de edificios, automóviles, fotografía, aeroespacio, telecomunicaciones, electrónica, entre otras situaciones (ver revisión de Browning, 2001).

Desde el punto de vista de la programación de secuencias de actividades podemos decir que existen tres tipos de configuraciones como se muestra en la Fig. 1. Estos son paralelo, secuencial o acoplados. En la configuración paralela los elementos no interactúan recíprocamente uno con otro, por ejemplo, la actividad de C y D no requieren ningún intercambio de información entre ellas, en cambio en la secuencial un elemento influye en el comportamiento o la decisión del otro elemento en una manera unidireccional, es decir los parámetros del elemento B se selecciona en base a los parámetros de A. En el sistema acoplado el flujo de información es entrelazada debido a que el elemento E influye a F y viceversa. La DSM a sido identificada como una herramienta potencial para representar actividades que presentan interrelaciones (Eppinger et al., 2008). Según la revisión bibliográfica realizada no hay trabajos publicados que consideren la incertidumbre en la DSM, sin embargo la DSM ha sido utilizada para analizar la incertidumbre en la toma de decisiones basada en modelación y simulación en el control aeroespacial de vuelos (Green y Blattnig, 2008).

### *Breve revisión sobre programación de actividades bajo incertidumbre*

La literatura sobre programación de proyectos se concentra en la generación de una programación factible de actividades que optimiza un objetivo, usualmente la duración del proyecto. Esta programación es utilizada como un programa de línea base que cumple varias funciones importantes (Aytug et al., 2005). Entre las funciones se encuentran: la localización de recursos a las diferentes actividades, servir como base para la planificación de actividades externas, servir como base para la comunicación y coordinación con entidades externas y permitir acuerdos y subcontrataciones. Sin embargo, y como se indicó anteriormente, existen numerosas incertidumbres que dificultan la programación de proyectos.

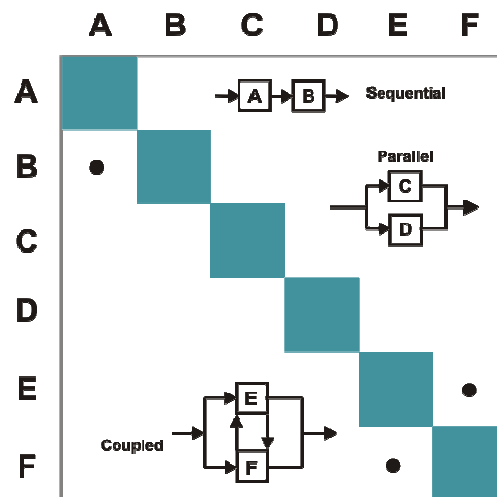


Fig. 1 Representación gráfica y DSM de las configuraciones posibles de proceso de un proyecto.

En general se pueden distinguir cinco formas para enfrentar la incertidumbre en la programación de proyectos (Herroelen y Leus, 2005): programación reactiva, programación estocástica, programación difusa, programación proactiva (robusta) y análisis de sensibilidad. La programación reactiva no trata de incorporar incertidumbre en el programa de línea base sino que revisa y reoptimiza el programa base cuando un evento no esperado ocurre (Vieira et al., 2003; Sabuncuoglu y Bayiz, 2000). La programación estocástica se concentra en la programación de las actividades del proyecto con duraciones inciertas con el objetivo de minimizar la duración esperada del proyecto utilizando restricciones de recursos y actividades con duraciones aleatorias. Este método no utiliza un programa de línea base y requiere de esfuerzos computacionales significativos (Demeulemeester y Herroelen, 2002). La programación de actividades difusas indica que las distribuciones probabilísticas de las duraciones de las actividades son desconocidas por la falta de datos históricos, y por lo tanto son estimadas usualmente por expertos humanos cuyos juicios son vagos e imprecisos. Así en vez de usar distribuciones probabilísticas se utilizan funciones de membresías basados en conjuntos difusos, los cuales se traducen en tiempos de inicio y finalización de actividades difusos (Slowinski y Hapke, 2000).

*Sistemas grises*

Cuando no se conoce la distribución de los parámetros inciertos, es posible utilizar sistemas grises o decisiones grises directamente en el análisis de sistemas. La teoría gris desarrollada por Deng (1982) se ha transformado en un método popular para resolver problemas bajo incertidumbre con datos discretos e información incompleta. Una de las ventajas de los sistemas grises es su fácil aplicación ya que no requiere conocer la distribución de los parámetros y no requiere de modelos intermedios complejos.

Una breve descripción de los números grises se entrega a continuación:

Definición 1. Sea  $x$  un conjunto cerrado y acotado de números reales. Un número gris  $x^\pm$  es definido como un intervalo conocido de límites superiores e inferiores, pero con distribución desconocida (Huang et al., 1992).

$$x^\pm = [x, \bar{x}] = [t \in x / \underline{x} \leq t \leq \bar{x}] \tag{1}$$

Donde  $\underline{x}$  y  $\bar{x}$  son los límites superiores e inferiores respectivamente. Cuando  $\underline{x} = \bar{x}$  corresponde a un número determinístico, es decir  $\underline{x} = \bar{x} = x^\pm$ .

Definición 2. El valor de blancura ( $x_v^\pm$ ) de un número gris,  $x^\pm$ , es definido como un número determinístico con un valor entre los límites superiores e inferiores de  $x^\pm$ ,

$$\underline{x} \leq x_v^\pm \leq \bar{x} \tag{2}$$

Definición 3. El valor blanqueado medio de  $x^\pm$  es definido como el valor medio entre sus límites superiores e inferiores y el ancho de  $x^\pm$  es la diferencia entre los límites. Así el valor blanqueado medio  $x_m^\pm$  y el ancho  $x_w^\pm$  de  $x^\pm$  es (Huang y Moore, 1993)

$$x_m^\pm = \frac{1}{2}[\underline{x} + \bar{x}] \tag{3}$$

$$x_w^\pm = \bar{x} - \underline{x} \tag{4}$$

Un número gris es un número que no se conoce con certeza su valor, sino que su rango. Si un número es totalmente conocido (ancho cero) se dice blanco, mientras si es totalmente desconocido (ancho infinito) se dice negro.

Definición 4. Si  $R^\pm$  denota un conjunto de números grises, un vector gris  $X^\pm$  es un vector de números grises y una matriz gris es una matriz cuyos elementos son números grises.

$$X^\pm = \{x_i^\pm = [\underline{x}_i, \bar{x}_i] \forall i\} \quad X^\pm \in \{R^\pm\}^{1 \times n} \tag{5}$$

$$X^\pm = \{x_i^\pm = [\underline{x}_i, \bar{x}_i] \forall i\} \quad X^\pm \in \{R^\pm\}^{m \times n} \tag{6}$$

Definición 5. Sea  $*$   $\in \{+, -, \times, \div\}$  una operación binaria sobre números grises, para un número gris,  $x^\pm$  y  $y^\pm$ , se tiene (Ishibuchi y Tanaka, 1990)

$$x^\pm * y^\pm = [\min(x * y), \max(x * y)], \quad \underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad \underline{y} \leq y \leq \bar{y} \tag{7}$$

Específicamente se tiene

$$x^\pm + y^\pm = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}] \tag{8}$$

$$x^\pm \cdot y^\pm = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}] \tag{9}$$

$$x^\pm \times y^\pm = [\min(x \times y), \max(x \times y)], \quad \underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad \underline{y} \leq y \leq \bar{y} \tag{10}$$

$$x^\pm \div y^\pm = [\min(x \div y), \max(x \div y)], \quad \underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad \underline{y} \leq y \leq \bar{y} \tag{11}$$

Definición 6. El grado de grisidad,  $Gd(x^\pm)$ , de un número gris  $x^\pm$  es definido como su ancho dividido por su valor medio, esto es

$$Gd(x^\pm) = 100 \times (x_w^\pm / x_m^\pm) \tag{12}$$

### TIEMPOS GRISES DE DURACIÓN DE PROYECTOS

En esta sección se desarrollan las formas de determinar los tiempos de duración de proyectos considerando incertidumbre usando sistemas grises, específicamente tiempos convencionales grises de duración de proyectos, tiempos normales grises de duración de proyectos con tiempos grises de comunicación, y tiempos normales grises de duración de proyectos con sobreposición natural.

*Tiempo Convencional Gris (TCG) de Duración de Proyectos*

El tiempo convencional de duración de proyecto, se puede determinar con la DSM, considerando el tiempo de duración de las actividades. Sin embargo, y como ya hemos discutido los tiempos de ejecución de las actividades incluyen incertidumbre y son difíciles de determinar exactamente. Además, si se utilizan distribuciones se necesita de un conjunto significativo de datos, los cuales usualmente no están disponibles. Luego una alternativa puede ser utilizar números grises para representar esa incertidumbre.

Definamos la matriz gris de estructura dependiente (GDSM, del inglés grey dependency structure matrix) como una DSM donde sus elementos son inciertos y representados por números grises. Así, y con el objetivo de determinar el tiempo convencional gris de duración de proyectos, utilizaremos tiempos grises de duración de actividades. Luego el tiempo convencional gris  $P_{TCG}^\pm$  de duración de proyectos se puede determinar como:

$$(EF)_i^\pm = (ES)_i^\pm + A_{ii}^\pm \quad 0 < i \leq n \quad (13)$$

$$(ES)_j^\pm = \text{Max}[(EF)_i^\pm] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (14)$$

$$P_{TCG}^\pm = \text{Max}[(EF)_j^\pm] \quad 0 < j \leq n \quad (15)$$

En donde,  $A_{ii}^\pm$ , representa las celdas diagonales de la matriz gris de estructura dependiente, y representan los tiempos grises de duración de las actividades. Por otra parte,  $n$  es el número de actividades;  $i$  todas las actividades predecesoras (intermedias) de  $j$ ;  $j$  la actividad actual seleccionada identificada por la matriz particionada GDSM. ES es el comienzo temprano (early Start) y EF es la finalización temprana (early finish). Los valores grises de las ecuaciones 13 a 15 se pueden determinar usando las siguientes ecuaciones.

$$(EF)_i^\pm = |\underline{EF}_i, \overline{EF}_i| = |(ES)_i + \underline{A}_{ii}, (\overline{ES})_i + \overline{A}_{ii}| \quad 0 < i \leq n \quad (16)$$

$$(ES)_i^\pm = |\underline{ES}_j, \overline{ES}_j| = |\text{Max}[(\underline{EF})_i], \text{Max}[(\overline{EF})_i]| \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (17)$$

$$P_{TCG}^\pm = |\underline{P}_{TCG}, \overline{P}_{TCG}| = |\text{Max}[(\underline{EF})_j], \text{Max}[(\overline{EF})_j]| \quad 0 < j \leq n \quad (18)$$

*Tiempo Normal Gris (TNG) de Duración de Proyectos con tiempos de comunicación.*

Maheswari y Varghese (2005b) han determinado el tiempo normal de duración de proyectos, con la DSM, usando los tiempos de comunicación entre las actividades y la duración de las actividades. Los tiempos de comunicación es el tiempo gastado en la obtención de información antes/después de la ejecución de la actividad, y representa el tiempo de reuniones, organizar reuniones, envío y recepción de correos, entre otras diligencias. Sin embargo, y como ya hemos discutido los tiempos de ejecución de las actividades y los tiempos de comunicación incluyen incertidumbre y son difíciles de determinar exactamente, razón por la cual es preferible considerar tiempos grises de comunicación. La duración del proyecto, incluyendo los tiempos grises de duración de cada actividad junto a los tiempos grises de comunicación,  $P_{TNG}^\pm$ , se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

$$(EF)_i^\pm = (ES)_i^\pm + A_{ii}^\pm \quad 0 < i \leq n \quad (19)$$

$$(ES)_j^\pm = \text{Max}[(EF)_i^\pm + A_{ji}^\pm] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (20)$$

$$P_{TNG}^\pm = \text{Max}[(EF)_j^\pm] \quad 0 < j \leq n \quad (21)$$

Donde los elementos de la diagonal de la GDMS,  $A_{ii}^\pm$ , (valores en la diagonal) corresponden a los tiempos grises de cada actividad, y los elementos fuera de la diagonal,  $A_{ji}^\pm$ , corresponden a los tiempos grises de comunicación. El significado de  $n$ ,  $i$  y  $j$  es el mismo indicado anteriormente. Los valores grises de las ecuaciones 19 a 21 se pueden determinar usando las siguientes ecuaciones.

$$(EF)_i^\pm = |\underline{EF}_i, \overline{EF}_i| = |(\underline{ES})_i + \underline{A}_{ii}, (\overline{ES})_i + \overline{A}_{ii}| \quad 0 < i \leq n \quad (23)$$

$$(ES)_j^\pm = |\underline{ES}_j, \overline{ES}_j| = |\text{Max}[(\underline{EF})_i + \underline{A}_{ji}], \text{Max}[(\overline{EF})_i + \overline{A}_{ji}]| \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (24)$$

$$P_{TNG}^\pm = |\underline{P}_{TNG}, \overline{P}_{TNG}| = |\text{Max}[(\underline{EF})_j], \text{Max}[(\overline{EF})_j]| \quad 0 < j \leq n \quad (25)$$

#### Tiempo Normal Gris de duración de proyectos con Superposición natural (TNGSN)

Cuando una actividad depende de otra se presentan dos casos: sin superposición y con superposición natural. El caso sin superposición es de interés para los administradores e implica un riesgo mínimo (comparativamente). La relación Fin-a-Inicio (FS) es la representación convencional de la relación entre las actividades en la matriz de estructura dependiente, que por sí sólo es insuficiente para representar los proyectos de superposición naturales. También es posible la estimación de la duración de superposición natural capturando el tiempo tomado para transferir la información entre las actividades mediante una relación Inicio-a-Inicio (SS). Las actividades sin superposición suponen que una actividad sucesora no se inicia hasta que las actividades antecesoras son totalmente finalizadas. Las actividades con superposición natural suponen que una actividad sucesora puede iniciarse antes de recibir información de las actividades antecesoras, y que las actividades antecesoras pueden entregar información a las actividades sucesoras antes de finalizar dichas actividades (Maheswari y Varghese, 2005b).

Los tiempos que permiten la superposición natural son representados por el “factor de tiempo”, el cual es definido como la razón entre el tiempo tomado para intercambiar cualquier información y el tiempo de ejecución de cualquier actividad. Estos tiempos están representados por los factores  $T_p$  y  $T_s$ , en donde  $T_p$  representa el factor de tiempo para enviar la información desde la actividad antecesora y  $T_s$  es el factor de tiempo para recibir la información para la actividad sucesora S. Considerando la incertidumbre en estos factores, es claro que en nuestra metodología estos serán representados por números grises. Para determinar el tiempo gris de duración del proyecto con superposición natural,  $P_{TNGSN}^\pm$ , podemos utilizar las siguientes ecuaciones

$$(ES)_j^\pm = \text{Max} \left[ [(\underline{ES})_i + (B_{ji} \times B_{ii}) - (C_{ji} \times C_{jj})]^\pm \right] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (26)$$

$$(EF)_j^\pm = (ES)_j^\pm + B_{jj}^\pm \quad 0 < j \leq n \quad (27)$$

$$P_{TNGSN}^\pm = \text{Max}[(EF)_j^\pm] \quad 0 < j \leq n \quad (28)$$

Donde  $B_{ji}^\pm$  y  $C_{ji}^\pm$  son dos matrices que representan los “factores grises de tiempo”,  $B_{ji}^\pm$  para todos los valores de  $T_p$  y  $C_{ji}^\pm$  para todos los valores  $T_s$ . El significado de los demás elementos de

las ecuaciones son las mismas indicadas anteriormente. Para determinar los números grises de las ecuaciones 25 a 27 se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$(\underline{ES})_j = \text{Max}[(\underline{ES})_i + (\underline{B}_{ji} \times \underline{B}_{ii}) - (\underline{C}_{ji} \times \underline{C}_{jj})] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (29)$$

$$(\overline{ES})_j = \text{Max}[(\overline{ES})_i + (\overline{B}_{ji} \times \overline{B}_{ii}) - (\overline{C}_{ji} \times \overline{C}_{jj})] \quad 0 < i \leq n, 0 < j \leq n \quad (30)$$

$$(\underline{EF})_j = (\underline{ES})_j + \underline{B}_{jj} \quad 0 < i \leq n \quad (31)$$

$$(\overline{EF})_j = (\overline{ES})_j + \overline{B}_{jj} \quad 0 < i \leq n \quad (32)$$

$$P_{TNGSN}^{\pm} = [P_{TNGSN}, \overline{P}_{TNGSN}] = [\text{Max}[(\underline{EF})_j], \text{Max}[(\overline{EF})_j]] \quad 0 < j \leq n \quad (33)$$

*Efecto de la incertidumbre individual sobre la incertidumbre global*

Si bien los procedimientos anteriores permiten conocer el nivel de incertidumbre que existe en los tiempos totales de desarrollo de un proyecto como consecuencia de la incertidumbre existente en los valores de los tiempos de cada actividad, nada sabemos sobre el efecto que genera cada incertidumbre en la incertidumbre global. Para evaluar este efecto introducimos el nivel de grisidad de un parámetro cualquiera  $d^{\pm}$ ,  $g_{d^{\pm}}$ , en donde  $d^{\pm}$  es un elemento de la matriz  $A^{\pm}$  o  $B^{\pm}$  o  $C^{\pm}$ , sobre la duración global del proyecto como:

$$g_{d^{\pm}} = \frac{P_w^{d^{\pm}}}{P_w^{\pm}} \quad (34)$$

En donde  $P_w^{d^{\pm}}$  es el ancho de la duración global (la diferencia entre los valores máximos y mínimos de la duración global del proyecto) considerando  $d^{\pm}$  como un valor gris y todos los demás parámetros en su valor blanqueado medio, mientras que  $P_w^{\pm}$  es el ancho de la duración global del proyecto considerando todos los parámetros como valores grises. Aquí por tiempo global entendemos la duración convencional, o la duración normal o la duración con superposición natural según sea el caso que se desea evaluar. Con cada valor de  $d^{\pm}$ , es posible determinar la matriz de grisidad de cada matriz, es decir  $g_{A^{\pm}}$ ,  $g_{B^{\pm}}$  y  $g_{C^{\pm}}$ , para las matrices  $A^{\pm}$ ,  $B^{\pm}$  y  $C^{\pm}$  respectivamente, y así poder analizar el efecto de la incertidumbre de cada parámetro.

**APLICACIONES**

Esta sección presenta el procedimiento de solución para estimar el tiempo convencional gris de duración de proyecto, el tiempo normal gris de duración de proyecto incluyendo tiempos de comunicación grises, y el tiempo normal gris de duración del proyecto con superposición natural. Para una clara comprensión, se aplica el procedimiento a una versión modificada del ejemplo de Maheswari y Varghese (2005b). Este ejemplo consiste de 10 actividades desde la A a la J, como se muestra en la tabla 1, donde además se entrega información sobre las predecesoras y los tiempos de duración grises.

*Estimación del tiempo convencional gris (TCG)*

La representación básica de actividades usando la matriz de estructura dependiente es una matriz cuadrada conteniendo las actividades en las filas y columnas. El orden de las actividades en las filas o columnas indica la secuencia de ejecución. La relación entre las actividades es representada por una "X" en las celdas de la diagonal inferior. Para lograr esto la matriz debe ser particionada, aspecto que se encuentra fuera del alcance de este trabajo. Las actividades deber ser leídas en la columna como "da información a" y en las filas como "necesita información de". La



Fig. 2 muestra la matriz de estructura dependiente particionada para nuestro ejemplo. La fila D nos indica que dicha actividad necesita información de las actividades antecesoras A y F. La columna D nos indica que dicha actividad entrega información a las actividades sucesoras B y I.

Tabla 1: Lista de actividades para el ejemplo

S. Número	Identificación Actividad	Información Predecesora	Duración (días)
1	A	-	[5,7-6,1]
2	B	D	[7,3-9,1]
3	C	A	[6,2-7,5]
4	D	A, F	[3,8-4,0]
5	E	B	[8,3-9,4]
6	F	A, C	[1,0-1,0]
7	G	F, J	[2,0-2,1]
8	H	I	[9,4-10,7]
9	I	D, G, E	[4,5-5,4]
10	j	F, B	[3,0-3,0]

	A	C	F	D	B	J	G	E	I	H
A										
C	X									
F		X								
D	X		X							
B				X						
J			X		X					
G			X			X				
E					X					
I				X			X	X		
H						X			X	

Fig. 2: Matriz de estructura dependiente particionada.

Para determinar el TCG de la duración del proyecto, primero se debe incluir los tiempos grises de cada actividad, como se muestra en la Fig. 3, en donde además se muestran los tiempos de comunicación grises. Se llamará a esta matriz,  $A^\pm$ , matriz gris de estructura dependiente (GDSM). Observe que por simplicidad, cuando los valores son determinísticos (blancos), estos se han indicado como un solo valor. Así, por ejemplo para la actividad F el tiempo gris de la actividad es [1,0 , 1,0] y se ha indicado simplemente como [1,0].

Luego utilizando las ecuaciones 13 a 18 se procede como sigue: Primero se considera que

$$(ES)_A^\pm = [ES_A, \overline{ES}_A] = [0,0] \text{ (no predecesores)}$$

$$(EF)_A^\pm = [EF_A, \overline{EF}_A] = [(ES)_A + A_{i1}, (\overline{ES})_A + \overline{A}_{i1}] \quad \text{donde } i=1 \text{ y } n=10$$

$$= [\underline{EF}_A, \overline{EF}_A] = [0 + 5, 7, 0 + 6, 1] = [5, 7, 6, 1]$$

$$(ES)_C^\pm = [\underline{ES}_C, \overline{ES}_C] = [\text{Max}[(\underline{EF})_A], \text{Max}[(\overline{EF})_A]] \quad \text{donde } i=1, j=2 \text{ y } n=10$$

$$= [\underline{ES}_C, \overline{ES}_C] = [\text{Max}[5, 7], \text{Max}[6, 1]] = [5, 7, 6, 1]$$

$$(EF)_C^\pm = [\underline{EF}_C, \overline{EF}_C] = [(\underline{ES})_C + \underline{A}_{22}, (\overline{ES})_C + \overline{A}_{22}] \quad \text{donde } i=2 \text{ y } n=10$$

$$= [\underline{EF}_C, \overline{EF}_C] = [5, 7 + 6, 2, 6, 1 + 7, 5] = [11, 9, 13, 6]$$

Una vez que los  $ES^\pm$  y  $EF^\pm$  han sido calculados para todas las actividades, el TCG de duración del proyecto se puede calcular con la ecuación 18, el cual corresponde a [46,2, 53,2] días, es decir existen 7 días de incertidumbre. Este tiempo se compara con los 50 días determinados por Maheswari y Varghese para este ejemplo con datos determinísticos.

	A	C	F	D	B	J	G	E	I	H
A	[5,7-6,1]									
C	[1,0]	[6,2-7,5]								
F		[1,8-2,0]	[1,0]							
D	[0,8]		[0,3]	[3,8-4,0]						
B				[3,7-4,4]	[7,3-9,1]					
J			[1,5]			[3,0]				
G			[0,1]			[0,4]	[2,0-2,1]			
E					[4,0-4,5]			[8,3-9,4]		
I				[3,3-3,6]			[1,9-2,1]	[2,7-3,4]	[4,5-5,4]	
H									[4,6-5,2]	[9,4-10,7]

Fig. 3: Matriz gris de estructura dependiente con la duración de cada actividad y el tiempo de comunicación.

*Estimación del tiempo normal gris con tiempos grises de comunicación (TNG)*

Si consideramos que existe un tiempo de comunicación, como los dados en los valores fuera de la diagonal en la Fig. 3, entonces el TNG de duración del proyecto se puede calcular usando las ecuaciones 19 a 24. Recuerde que los elementos de la diagonal de la GDSM,  $A_{ii}^\pm$ , corresponden a los tiempos grises de cada actividad, y los elementos fuera de la diagonal,  $A_{ji}^\pm$ , corresponden a los tiempos grises de comunicación. Una vez que los  $ES^\pm$  and  $EF^\pm$  han sido calculados para todas las actividades, el TNG de duración del proyecto con tiempos de comunicación se puede calcular con la ecuación 24, el cual corresponde a [64,3, 74,4] días, es decir existen 10,1 días de incertidumbre. Este tiempo se compara con los 69,8 días determinados por Maheswari y Varghese para este ejemplo con datos determinísticos.

Tiempo normal gris con superposición natural (TNGSN)

Para este caso es necesario incluir las matrices de factores de tiempo, también como valores grises, es decir sus valores se encuentran en ciertos rangos conocidos. Las Fig. 4 y 5 muestran los valores de las matrices grises  $B^\pm$  y  $C^\pm$ , donde  $B_{ji}^\pm$  representan todos los valores grises de  $T_p$  (información predecesora a la actividad, i.e. [0,76 , 0,8] en  $B_{12}$  implica que A puede enviar la información requerida por C al final de [0,76 , 0,8] veces su duración ) y  $C_{ji}^\pm$  representan todos los valores grises de  $T_s$  (factor de tiempo de recepción de información, i.e. [0,09 , 0,1] en  $C_{41}^\pm$  implica que es esencial para D recibir la información de A solo a [0,09 , 0,1] veces su duración en vez de al inicio para continuar su ejecución). Para determinar el TNGSN de duración del proyecto podemos utilizar las ecuaciones 25 a 32. Los cálculos de  $ES^\pm$  y  $EF^\pm$  es análogo al descrito por Maheswari y Varghese, pero usando números grises. Una vez calculados todos los  $ES^\pm$  y  $EF^\pm$  de las actividades, el TNGSN de duración del proyecto se determina con la ecuación 32, y corresponde a [27,013 , 57,188], es decir existe 30,175 días de incertidumbre. Este valor se compara con 33,1 días para el caso determinístico de Maheswari y Varghese (2005b).

$B^\pm =$

	A	C	F	D	B	J	G	E	I	H
A										
C	[0.76-0.8]									
F		[0.57-0.6]								
D	[0.79-0,8]		[0.67-0.7]							
B				[0.87-0.9]						
J			[0.89-0.9]		[0.92-1.0]					
G			[0.46-0.5]			[0.96-1.0]				
E					[0.83-0.9,0-4,5]					
I				[0.56-0.6]			[0.79-0.8]	[0.96-1.0]		
H									[0.63-0.7]	

Fig. 4: Matriz gris de factores de tiempo  $T_p$

$C^\pm =$

	A	C	F	D	B	J	G	E	I	H
A										
C	[0.1]									
F		[0.3-0.32]								
D	[0.09-0,1]		[0.19-0.21]							
B				[0.35-0.4]						
J			[0.18-0.21]							
G			[0.46-0.5]			[0.3-0.32]				
E					[0.1]					
I				[0.18-0.21]			[0.49-0.63]			
H									[0.38-0.43]	

Fig. 5: Matriz gris de factores de tiempo  $T_s$

*Efecto de la incertidumbre individual sobre la incertidumbre global*

Como se indicó anteriormente, es posible evaluar el efecto de la incertidumbre de un parámetro  $d^{\pm}$ ,  $g_{d^{\pm}}$ , en donde  $d^{\pm}$  es un elemento de la matriz  $A^{\pm}$ ,  $B^{\pm}$  o  $C^{\pm}$ , sobre la duración global del proyecto usando la ecuación 33. La tabla 2 nos muestra la incertidumbre de cada actividad y los tiempos de comunicación sobre la incertidumbre global, a través del nivel de grisicidad. Como se puede ver, la posición (5,5) es la que presenta una mayor incertidumbre sobre la incertidumbre global, es decir la incertidumbre del tiempo de duración de la actividad B es la que más afecta a la incertidumbre global. La tabla 3 muestra la incertidumbre de los factores de tiempo  $T_p$ , sobre la incertidumbre global, a través del nivel de grisicidad. Como se puede ver, la posición (9,8) es la que presenta una mayor incertidumbre sobre la incertidumbre global.

Tabla 2: Valores de la matriz de grisicidad  $g_{A^{\pm}}$ 

Posición	Valor	Posición	Valor	Posición	Valor	Posición	Valor
(1,1)	0.0103	(4,3)	0	(7,3)	0	(9,7)	0
(2,1)	0	(4,4)	0.0072	(7,6)	0	(9,8)	0
(2,2)	0.1927	(5,4)	0	(7,7)	0	(9,9)	0.0198
(3,2)	0	(5,5)	0.2903	(8,5)	0	(10,9)	0
(3,3)	0	(6,3)	0	(8,8)	0.0394	(10,10)	0.0605
(4,1)	0	(6,6)	0	(9,4)	0		

Tabla 3: Valores de la matriz de grisicidad  $g_{B^{\pm}}$ 

Posición	Valor	Posición	Valor	Posición	Valor	Posición	Valor
(2,1)	0.0078	(5,4)	0.0039	(7,6)	0	(9,8)	0.0117
(3,2)	0.0068	(6,3)	0	(8,5)	0.0190	(10,9)	0.0115
(4,1)	0	(6,5)	0	(9,4)	0		
(4,3)	0.0009	(7,3)	0	(9,7)	0		

La tabla 4, muestra la incertidumbre de los factores de tiempo  $T_s$ , sobre la incertidumbre global, a través del nivel de grisicidad. Como se puede ver, la posición (10,9), es la que presenta una mayor incertidumbre sobre la incertidumbre global. Sin embargo, comparando la tabla 2, 3 y 4 es claro que la incertidumbre en los tiempos de cada actividad es lo que más afecta a la incertidumbre global.

Tabla 4: Valores de la Matriz de grisicidad  $g_{C^{\pm}}$ 

Posición	Valor	Posición	Valor	Posición	Valor	Posición	Valor
(2,1)	0	(5,4)	0.0136	(7,6)	0	(9,8)	0
(3,2)	0.0006	(6,3)	0	(8,5)	0	(10,9)	0.0167
(4,1)	0	(6,5)	0	(9,4)	0		
(4,3)	0.0026	(7,3)	0	(9,7)	0		

### Comentarios

Como fue observado por Maheswari y Verghese el tiempo convencional puede ser una herramienta simple para estimar la duración del proyecto, pero será difícil analizar los tiempos de comunicación entre actividades, situación que se puede mejorar con el tiempo convencional con tiempos de comunicación. La estimación de la duración de proyecto con superposición natural puede cambiar significativamente el orden de ejecución de los proyectos. Estas observaciones también son válidas para tiempos grises de duración de proyectos, como se verá más adelante.

Los tiempos grises calculados corresponden a un rango esperado de duración del proyecto. Como la distribución no es conocida no se puede conocer las probabilidades de duración del proyecto o cual es el valor más probable y si los valores extremos tienen poca probabilidad de ocurrencia, etc. Sin embargo, el sentido común hace pensar que el tiempo de duración del proyecto estará cerca del valor medio, o valor blanqueado medio, del número gris, y que los valores extremos tienen menor probabilidad de ocurrencia. Así el tiempo gris convencional [46,2 , 53,2] tiene un tiempo convencional medio de 49,7 días con un ancho de 7 días, el tiempo normal gris con tiempos grises de comunicación [64,3 , 74,4] tiene un valor medio de 69,35 días y un ancho de 10,1 días, mientras que el tiempo normal gris con superposición natural y factor de tiempo gris [27,01 , 57,19] tiene un valor medio de 42,1 días y un ancho de 33,1 días. En el TCG y TNG el ancho no es muy significativo y se puede considerar que el sistema de números grises entrega resultados útiles para evaluar la incertidumbre. Sin embargo, en el TNGSN presenta un ancho significativo, indicando una gran incertidumbre en el tiempo de duración. Esto se explica porque el TNGSN incluye en su cálculo multiplicaciones que tienden a ampliar el rango de los valores grises. La diferencia de valores entre TCG, TNG y el TNGSN también se observan en el trabajo de Maheswari y Verghese (2005) y se deben a las diferentes políticas de programación de las actividades o a diferentes factores considerados en sus cálculos.

Los niveles de grisicidad son un buen indicador para evaluar que actividades parecen más críticas para reducir la incertidumbre en los tiempos de duración. La identificación de estas actividades críticas permite mejor realizar estudios de casos o análisis de sensibilidad puesto que identifica las variables que pueden tener un mayor impacto cuando se desea reducir la incertidumbre. Además, como los tiempos de duración de cada actividad, los tiempos de comunicación y los factores de tiempo son valores estimados, ya sea a partir de datos históricos o a partir de expertos, la identificación de las actividades críticas puede incluir una revisión de la forma como fueron asignados valores a esas variables con el objetivo de tener una mejor aproximación de los tiempos de duración.

### *Proyecto planta de ácido sulfúrico*

Este caso estudio, que se analizará brevemente corresponde a un proyecto de construcción de una Planta de Ácido Sulfúrico. El proyecto contiene un cronograma de 26 actividades, que presentan un cierto grado de incertidumbre en los tiempos de duración de cada actividad, tiempos de comunicación y los factores de tiempo  $T_p$  y  $T_s$ . La tabla 5 muestra el listado de actividades de todo el proyecto, la identificación de cada actividad, la duración determinística y la duración gris de cada actividad. En la Tabla, I=identificación; PI=Información Predecesora; Det=valor determinístico; OC=Obras Civiles; C=Contratos; OM=Obras Mecánicas; TA=Tanques de Almacenamiento; y TAL=Tanques de Almacenamiento.

Los resultados obtenidos corresponden a [263,2 , 240,3] semanas para el TCG, es decir existen 22,9 semanas de incertidumbre (valor determinístico es de 254,4 semanas); [296,0 , 271,8] semanas para el TNG, es decir existen 24,2 semanas de incertidumbre (valor determinístico es de 287 semanas); [566,9 , 135,36] semanas para el TNGSN, es decir existen 431,54 semanas de incertidumbre (valor determinístico es de 156,6 semanas).

Tabla 5: Lista de actividades e identificación de actividades.

Actividad	I	PI	Duración (semanas)	
			Det	Gris
Flujograma de Diagrama de Procesos	A		9	9.7-8.9
Diseño de equipos	B	A	15	15-14.8
Planos de Plantas y Elevaciones	C	B	20	20.9-19.5
Reporte Final y Estimado de Costos	D	C	22	22.4-20.2
Ingeniería Básica	E	D	20	21.1-18.8
Ingeniería de Detalle	F	E	27.7	28.6-25.9
Compra de Equipos( Logística)	G	F	50	50.9-46.8
Elaboración de Invitación ( OC-C)	H	G	4.8	5.1-4.7
Licitación, Evaluación y Adjudicación ( OC-C)	I	H	4.8	4.8-4.5
Construcción ( OC-C)	J	I	48	51.3-46
Elaboración de Invitación ( OM-C)	K	I	7.2	7.5-6.7
Licitación, Evaluación y Adjudicación ( OM-C)	L	K	6	6.3-5.7
Montajes de Equipos Principales (OM-C)	M	L	28.8	30.5-28.8
Suministro y Fabricación de Estructuras Metálicas	N	L	34	36.1-31.4
Montaje de Estructuras Metálicas	Ñ	N	34	34.8-32.4
Suministro ( Instrumentación y Control)	O	G	38.4	38.4-36.1
Montaje ( Instrumentación y Control)	P	O	22.8	23-22.8
Suministro de Equipos ( Trabajos Eléctricos)	Q	G	38.4	40.8-35.4
Montaje ( Trabajos Eléctricos)	R	Q	20	21.2-19.5
Elaboración de Invitación (TAL)	S	E	4.8	5.1-4.7
Licitación, Evaluación y Adjudicación (TA )	T	S	4.8	5.1-4.8
Ingeniería (TA)	V	T	6	6.2-6.0
Obras Civiles (TA)	W	V	9.6	10.3-9.4
Fabricación (TA)	X	W	8.4	8.4-8.1
Montaje (TA)	Y	X	8.4	8.7-7.7
Pruebas y Puesta en Marcha	Z	P,R,X,Y	7.6	7.6-7.4

## CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se puede concluir lo siguiente: a) Se ha demostrado que la Matriz de Estructura Dependiente (DSM), puede ser utilizada para planificar las secuencias de actividades, manejar los intercambios y flujos de información; y para determinar el tiempo de duración de proyectos con y sin superposición natural. b) La introducción de números grises permite cuantificar la incertidumbre existente en la determinación de los tiempos de duración de proyectos considerando la incertidumbre presente en los diferentes tiempos de ejecución de cada actividad, así como en los factores de tiempo con superposición natural. El proceso desarrollado fue llamado Matriz Gris de Estructura Dependiente. c) El efecto de la incertidumbre individual sobre la incertidumbre global, es decir cuánto influye la incertidumbre de cada actividad, tiempo de

comunicación y factores de tiempo, en la duración global del proyecto, se pudo evaluar introduciendo el efecto del nivel de grisicidad y así determinar la matriz de grisicidad de cada matriz. d) Un proyecto de ingeniería de una planta metalúrgica fue incluida, lo cual muestra que aunque esta es una herramienta general, puede ser de gran utilidad en proyecto de ingeniería metalúrgica.

El trabajo futuro se orientará a estudiar otras herramientas para incluir la incertidumbre en la determinación de los tiempos de duración de un proyecto. Esto con el objetivo de identificar ventajas y desventajas, y así poder proponer soluciones para introducir la incertidumbre en la programación de actividades usando DSM. Entre las herramientas a considerar se incluyen simulación de Monte Carlo, análisis de varianza, y sistemas difusos.

## REFERENCIAS

Aytug H., M. A. Lawley, K. McKay, S. Mohan y R. Uzsoy, *Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions*, European Journal of Operational Research: 161 (1), 86-110 (2005).

Browning, T.R., *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 (2001).

Chen CH., SF. Ling y W. Chen, *Project scheduling for collaborative product development using DSM*. Int. J. Project Management: 21 (4), 291-299 (2003).

Cronemyr P., A.O. Rönnbäck y S.D. Eppinger, *A decision support tools for predicting the impact of development process improvements*, J. Eng. Design: 12 (3), 177-199 (2001).

Cruz-Machado, V. y P. Rosa, *Modelo de planificación basado en construcción ajustada para obras de corta duración*, Información Tecnológica: 18(1), 107-118 (2007).

Davenport, A.J. y J.C. Beck, *A Survey of techniques for scheduling with uncertainty*, *Unpublished manuscript*. Available from <http://www.eil.utoronto.ca/profiles/chris/gz/uncertainty-survey.ps> (2002).

Dmeulemesster, E.L. y W.S. Herroelen, *Project scheduling – A research Handbook*. Kluwer Academic Publishers, Boston (2002).

Deng J., *Control problems of grey systems*. Sys Control Lett: 5(2), 288–294 (1982).

Eppinger SD, D.E. Whitney, R.P. Smith y D.A. Gebala, *A model-based method for organizing tasks in product development*. Res Eng Des.: 6(1), 13 (1994).

Eppinger, S.D., D.E. Whitney y A.A. Yassine, *The design structure matrix – DSM Home page*, <http://www.dsmweb.org/>, Acceso: 13 de Julio (2008).

Goldratt, E., *Critical Chain*. The north river press (1997).

Green LL. y SR. Blattinig, *An Uncertainty structure matrix for models and simulations*, AIAA: 2154, Abril (2008).

Herroelen W. y R. Leus, *Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials*, European Journal of Operational Research: 165, 289-306 (2005).

Huang, G. y R.D. Moore, *Grey linear programming, its solving approach, and its application*, International Journal of Systems Science: 24, 159-172 (1993).

Huang, G., B.W. Baetz y G.G. Patty, *A grey linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty*, Civil Engineering Systems: 9, 319-335 (1992).

- Ishibuchi, H. y H. Tanaka, *Multiobjective programming in optimization of the interval objective function*, European Journal of Operational Research: 48, 219-225 (1990).
- Maheswari J.U. y K. Varghese, *A structured approach to form dependency structure matrix for construction projects*, 22<sup>nd</sup> International symposium on Automation and robotic in construction, ISARC 2005, Septiembre 11-14, Ferrara (Italia) (2005a)
- Maheswari J.U. y K. Varghese, *Project scheduling using dependency structure matrix*, International Journal of Project Management: 23 (3), 223-230 (2005b).
- Perminova O., M. Gustafsson y K. Wikström, *Defining uncertainty in projects-a new perspective*, Int. J. Proj. Management: 26, 73-79 (2007).
- Sabuncuoglu, I. y M. Bayiz, *Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment*. European Journal of operational research: 126, 567-586 (2000).
- Smith R.P. y J.A. Morrow, *Product development process modeling*, Design studies: 20, 237-261 (1999).
- Slowinski, R. y M. Hapke (Eds.), *Scheduling under fuzziness*. Physica – Verlag, Heidelberg (2000).
- Tang D., R. Zhu, J. Tang, R. Xu y R. He, *Product design knowledge management based on design structure matrix*, Advanced Engineering Informatics: 24, 159-166 (2010).
- Vieira GE., JW. Herrmann y E. Lin, *Rescheduling manufacturing systems: A framework of strategies, policies and methods*. Journal of Scheduling: 6, 39-62 (2003).
- Yassine A, D. Falkenburg y K. Chelst, *Engineering design management: an information structure approach*. Int J Prod Res: 37(13), 2957–2975 (1999).