

Coordinación del abastecimiento en proyectos de ingeniería mediante modelos de optimización¹

Supply coordination in engineering projects through optimization models

Coordenação do fornecimento em projetos de engenharia utilizando modelos de otimização

J.P Zamora, J.E. Rocha , y W. Adarme

Recibido: Diciembre 10 de 2016 - Aceptado: enero 13 de 2017

Resumen — Se aborda el problema de programación de proyectos (PSP) para coordinar y programar el abastecimiento en la red de suministro de una empresa basada en proyectos (PBO - Project Based Organizations). El modelo considera, en un primer aspecto, el costo asignable a la utilización de recursos durante la ejecución de las actividades y posteriormente la programación del suministro de recursos y los flujos de caja con destino al pago de proveedores, considerando como limitaciones entre otras, la capacidad y diversidad de recursos ofertados por los proveedores del proyecto. En los resultados se observa que a partir de la aplicación de la estrategia de coordinación de información compartida, es posible optimizar el costo de la gestión de abastecimiento en proyectos. La metodología desarrollada puede ser aplicada por organizaciones PBO o por compañías que realicen proyectos de forma eventual.

Palabras clave — abastecimiento, programación, coordinación, proyectos, logística, cadena de suministro.

Abstract—A project-scheduling problem (PSP) is addressed to coordinate and program supply in the chain of a company

¹ Producto derivado del proyecto de investigación “Definición de estrategias para la gestión sustentable de la cadena de suministro de una empresa basada en proyectos” presentado por el Grupo de Investigación en Ingeniería Industrial GIII de la Universidad de la Salle. Colombia.

J.P Zamora. Docente Investigador tiempo completo. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. jpzamora@unisalle.edu.co

J.E. Rocha, Docente investigador Tiempo Completo, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. Docente Cátedra Planta, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. jerocha@unisalle.edu.co, jerochag@unal.edu.co

W. Adarme, Docente Dedicación Exclusiva, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. wadarme@unal.edu.co

based on projects (PBO - Project Based Organizations). The model firstly considered the cost attributable to the use of resources needed for the implementation of such activities, and subsequently programming of the provision of resources and cash flow bound to pay suppliers, considering among other limitations the capacity and diversity of resources offered by suppliers of the project. The results show that after the implementation of the strategy of coordination of shared information, the cost of procurement management could be optimized within projects. The methodology developed can be applied by PBO organizations or companies that eventually carry out projects.

Key words — supply, scheduling, coordination, projects, logistics, supply chain.

Resumo - Se expõe o tema de programação de projetos (PSP) para coordenar e programar o abastecimento na rede de fornecimento de uma empresa baseada em projetos (PBO - Project Based Organizations). O modelo considera, num primeiro aspecto, o custo atribuído à utilização de recursos durante a execução das atividades e posteriormente a programação do fornecimento de recursos e os fluxos de Caixa destinado ao pagamento de fornecedores, considerando como limitações entre outros, a capacidade e diversidade de recursos oferecidos pelos fornecedores do projeto. Nos resultados se observa que a partir da aplicação da estratégia de coordenação de informação compartilhada, é possível melhorar o custo do gerenciamento de abastecimento em projetos. A metodologia desenvolvida pode ser aplicada por organizações PBO ou por companhias que realizem projetos de forma eventual.

Palavras chave—abastecimento, programação, coordenação, projetos, logística, cadeia de fornecimento.

I. INTRODUCCIÓN

Las operaciones logísticas en proyectos de ingeniería se desarrollan en ambientes complejos que pueden involucrar diferencias en cantidad, oportunidad y calidad entre la oferta y demanda de materiales, insumos y servicios para la ejecución de proyectos.

Este desequilibrio en la cadena de suministro, en términos de capacidades disponibles, tiempos de respuesta y niveles de servicio, obligan a los gestores de proyectos a establecer políticas de acción que garanticen el oportuno suministro de recursos y la continuidad de las operaciones de ejecución de cada proyecto.

El abastecimiento en proyectos de ingeniería debe responder a las condiciones particulares de demanda discontinua, a la singularidad de los términos técnicos y financieros, y a la complejidad e incertidumbre en los sistemas de aprovisionamiento de proyectos [1] [2].

Una característica usual en la ejecución de proyectos está relacionada con las condiciones de múltiples recepciones de recursos durante diferentes etapas del proyecto provenientes de distintos proveedores, quienes ofrecen variadas especificaciones de materiales, insumos o servicios para atender la demanda particular de una actividad determinada en la ejecución de un proyecto.

En el contexto de las organizaciones basadas en proyectos (PBO – por sus siglas en inglés), es frecuente que se presenten sobre tiempos de las actividades programadas, mayores presupuestos, y en general falta de productividad [3]. Estas situaciones resultan principalmente de la ausencia de estrategias efectivas de relacionamiento entre empresas, lo que tiene implicaciones importantes en el logro de los objetivos de los proyectos [4].

En el relacionamiento entre las partes involucradas en las redes de suministro de proyectos (RSP) se ha aplicado un enfoque técnico mediante la definición de mecanismos de coordinación de información compartida que se centran en el conocimiento de los objetivos y de las capacidades de los participantes en la RSP [5]. Este tipo de mecanismos favorecen el rendimiento y la productividad de los proyectos si se establecen las condiciones técnicas y operacionales para la integración de las cadenas de suministro participantes en las RSP [6].

En el contexto de los proyectos se han desarrollado trabajos que priorizan el relacionamiento mediante enfoques de integración, cooperación y coordinación, sin embargo es un reto para las PBO la aplicación efectiva de mecanismos de coordinación de la RSP, principalmente por las barreras relacionadas con la actitud entre las partes, la calidad de la información compartida, los costos y finanzas basadas en la negociación, y los aspectos de incertidumbre en tiempos y programación de actividades [7] [8].

El aumento en el nivel de competencia entre las empresas y las mayores exigencias de los clientes en términos de costo, tiempo, calidad y planificación más segura, han llevado a las organizaciones basadas en proyectos a vincular a redes de organizaciones externas, que faciliten desarrollar las estrategias de gestión de cadena de suministro [3].

La efectividad de estos mecanismos de coordinación,

son resultado de la programación de los sistemas de abastecimiento a partir de información real de demanda y de las capacidades productivas en tiempo de los diferentes actores de la red.

La formalización de medios contractuales, permite en la práctica, la aplicación efectiva de los mecanismos de coordinación y fortalecen la confianza en la relaciones de actores en las redes de suministro [9].

En tal sentido, esta investigación presenta la metodología aplicada a un caso de estudio de una PBO del sector industrial, que busca el aprovechamiento óptimo de los recursos, bajo el contexto de la coordinación de la RSP, para el abastecimiento con mecanismos de información compartida y utilizando técnicas de programación basadas en optimización.

II. COORDINACIÓN DEL ABASTECIMIENTO

El aprovisionamiento es un componente funcional de la logística y se encarga de la gestión de los flujos de entrada de materiales, suministros y servicios que son necesarios para las operaciones de producción y comercialización en los diferentes eslabones de la cadena de suministro [10] [11]. Los procesos de aprovisionamiento incluyen la planeación del abastecimiento, la selección de los proveedores, el diseño de los contratos con los proveedores, la colaboración en el diseño del producto, el abastecimiento de materiales o servicios y la evaluación del desempeño de los proveedores.

Para las organizaciones que basan sus operaciones en proyectos (PBO – por sus siglas en inglés), el aprovisionamiento debe responder a las necesidades temporales de suministro de materiales, productos y servicios específicos, en ventanas de tiempo establecidas dentro de la programación del proyecto, para lograr los objetivos propuestos.

En proyectos, los problemas de aprovisionamiento han sido abordados desde la perspectiva de la negociación mediante el desarrollo de modelos de contratación [12], los cuales evalúan modelos de reserva de capacidad de los proveedores para el abastecimiento programado en diferentes periodos de tiempo [13], en otro aspecto, se desarrollan modelos mixtos, donde se evalúan modelos con reserva de capacidad y otros con compra al momento de la necesidad. Para estrategias de compra bajo incertidumbre, se han aplicado modelos de reserva de capacidad con los proveedores, que reducen el riesgo por cambios en las condiciones del mercado [14].

III. OPTIMIZACIÓN EN PROYECTOS

Los problemas de programación de proyectos (PSP – por sus siglas en inglés) han recibido mucha atención y han desempeñado un papel vital en el manejo de recursos de las PBO. Generalmente los PSP se definen por sus actividades, con los tiempos de ejecución específica, y por las relaciones de precedencia entre ellos [15]. Se han desarrollado esquemas de clasificación de modelos para la optimización de proyectos, MPS (multi-mode project scheduling) que involucran restricciones de tipos recursos y programación multimodo en proyectos [16].

Otra extensión de PSP muy utilizada son los problemas de programación complejos con recursos limitados (RCPSP), sobre los cuales se establecen restricciones de precedencia y de limitación de recursos [17]. Se han vinculado modelos RCPSP a criterios de optimización relacionados con la minimización del *makespan* [18] y otros con la maximización del VAN basado en la disponibilidad de los flujos monetarios del proyecto y a la minimización de los costos totales. El desarrollo de modelos de optimización de la red de suministro para programación de proyectos contemplando restricciones de disponibilidad de recursos, gestión de los inventarios y costos en los proyectos ha sido abordado en otros contextos. [19].

IV. MÉTODO EMPLEADO

Se desarrolla un método de planeación en el que se incorporan dos modelos de optimización para determinar el programa de abastecimiento de materiales, teniendo como fundamento la decisión sobre cantidad, producto, proveedor, tiempo y costo en las operaciones de suministro. El mecanismo de coordinación de información compartida con proveedores, proporciona la información de capacidades de suministro por tipo de producto, por etapa del proyecto, tiempo o actividad.

De esta manera, los parámetros de entrada en el primer modelo son la definición de las etapas o actividades del proyecto con sus asociaciones de precedencias o sucedencias; la duración máxima y mínima esperada de ejecución por etapa o actividad, a partir de las fechas de inicio y terminación más tempranas y más tardías, que corresponde a los tiempos en los cuales se concentra el factor crítico de decisión del suministro. [20].

Una vez definidos estos tiempos, en el segundo modelo se utilizarán como insumo para establecer las fechas críticas en las cuales se requiere el suministro de materiales, así como la planeación del flujo de caja para la operación eficiente del proyecto. Se determinan las cantidades de cada material a adquirir desde los diversos proveedores, tomando como restricciones del sistema la demanda por etapas o actividades, la capacidad del suministro por tipo de producto y proveedor, la disponibilidad máxima estimada de dinero por etapa o actividad y los costos de operación logística por tener a disposición los materiales necesarios.

A. Modelo de optimización para duración de actividades y costo directo del proyecto

El modelado de la primera fase de optimización se fundamenta en las convenciones mostradas en la Figura 1.

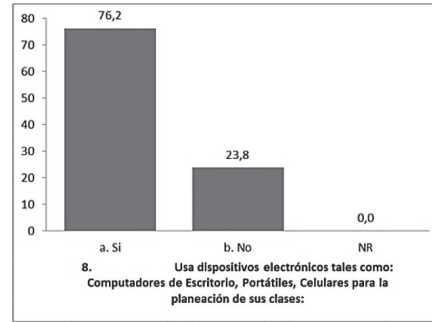


Fig. 1. Convenciones para la programación del proyecto.

Donde:

- T_i^- : Tiempo de iniciación más temprana de la actividad i-j.
- T_i^+ : Tiempo de iniciación más tardía de la actividad i-j.
- T_j^- : Tiempo de finalización más temprana de la actividad i-j.
- T_j^+ : Tiempo de finalización más tardía de la actividad i-j.
- t_{ij} : Tiempo de duración estimada de la actividad i-j.
- i : Numeración de la fecha de inicio de la actividad i-j
- j : Numeración de la fecha de finalización de la actividad i-j

De acuerdo a lo anterior, cada actividad está limitada por un evento de inicio y un evento de fin representado por los nodos, en el cual se determinan las fechas de inicio y terminación, de igual manera cada actividad se determina por un arco que incluye su duración y número de recursos requeridos.

Según la nomenclatura ya descrita, el modelo matemático de optimización para encontrar los tiempos óptimos de duración de las actividades incluidas en un proyecto está determinado por:

1) Objetivo

Determinar la duración óptima de cada actividad (i-j) de un proyecto con mínimo costo directo, para una duración total proyectada del mismo.

2) Función objetivo

Costo total directo de operación en utilización de recursos de maquinaria, mano de obra y energía del proyecto.

3) Parámetros

- C_{ij} : Incremento lineal de costo directo por unidad de tiempo a transcurrir de la actividad (i-j).
- C_{ij}^+ : Costo asociado al evento o fecha de inicio de la actividad (es) (i-j) del proyecto.
- B_{ij} : Relación entre costos y duración de la actividad i-j.
- TN_{ij} : Tiempo normal (máximo) esperado de duración de la actividad (i-j).
- TL_{ij} : Tiempo límite (mínimo) esperado de duración de la actividad (i-j).
- k_1 : Fecha de iniciación del proyecto.
- k_2 : Fecha de finalización esperada del proyecto o de una (s) actividad (es) (i-j) a controlar en el propósito de la ejecución.

4) Variables de decisión

- t_{ij} : Tiempo de duración estimada de la actividad (i-j) con inicio en la fecha i y terminación en la fecha j en el cronograma del proyecto; con $i \neq j = 1, 2, 3, \dots, n$

T_j^+ : Finalización más tardía de la (s) actividad (es) (i-j) en la fecha j del cronograma del proyecto .

5) Modelo matemático

$$\text{Min } F(t) = \sum_{i-j} -C_{ij} * t_{ij} + \sum_{i-j} B_{ij} \quad (1)$$

S. A:

$$t_{ij} \leq TN_{ij} \quad \forall (i-j) \quad (2)$$

$$t_{ij} \geq TL_{ij} \quad \forall (i-j) \quad (3)$$

$$T_j^+ - t_{ij} - T_i^+ \geq 0 \quad \forall (i-j) \quad (4)$$

$$T_1^+ = k_1 \quad \text{Para } j = 1 \quad (5)$$

$$T_j^+ = k_2 \quad \text{Para } j = n \quad (6)$$

$$T_j^+, t_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

Incremento lineal de costo por actividad del proyecto:

$$C_{ij} = \Delta c = \frac{Cl_{ij} - Cn_{ij}}{Tn_{ij} - Tl_{ij}} \quad (8)$$

Relación entre costos y duración por actividad del proyecto:

$$B_{ij} = \frac{Tn_{ij} * Cl_{ij} - Tl_{ij} * Cn_{ij}}{Tn_{ij} - Tl_{ij}} \quad (9)$$

Donde:

Cl_{ij} : Costo límite o máximo de realización de una actividad (i-j) para una mínima duración de la actividad con saturación de recursos.

Cn_{ij} : Costo normal o mínimo de realización de una actividad (i-j) para una máxima duración de la actividad con utilización de recursos mínimos.

Tl_{ij} : Tiempo límite o mínimo de realización de una actividad (i-j) para la cual es posible encontrar el costo máximo por utilización de recursos.

Tn_{ij} : Tiempo normal o máximo de realización de una actividad (i-j) en el cual se encuentra el costo mínimo de la utilización de recursos utilizados.

En la expresión matemática (1), el costo total del proyecto se determina por el Cl_{ij} que representa incremento lineal de costo por cada unidad de tiempo a reducir para una duración más corta de los t_{ij} lo que ocasiona una minimización de la duración de las actividades con un costo estimado de manera óptima.

En las expresiones matemáticas (2) y (3), los t_{ij} están limitados por los tiempos normales y límites establecidos para la ejecución de las actividades con diferentes combinaciones y números de recursos a utilizar.

En la expresión (4), el modelo representa cómo estimar las fechas de inicio y terminación de cada actividad a medida que transcurre el proyecto incluyendo sus relaciones lógicas de dependencia y las holguras de las actividades no críticas, permitiendo además la estimación de las fechas máximas de inicio de cualquier actividad dentro del mismo.

Se establece como fecha más tardía de iniciación de las actividades iniciales del proyecto y como consecuencia de éste, la primera fecha disponible del calendario de ejecución para el caso la fecha cero (0) del mismo en la expresión matemática (5).

En la expresión matemática (6), se establece la duración total del proyecto, que corresponde a la meta de terminación de todas las actividades, y para la cual se estima de manera óptima el costo, los tiempos de duración de cada actividad y las fechas de inicio y terminación de cada actividad perteneciente al proyecto.

Una vez realizado este modelo de programación matemática y mediante la técnica de análisis de sensibilidad sobre los elementos del vector de disponibilidad, en cada representación de un proyecto se obtendrán las fechas calendario de inicio y terminación más temprana y tardía para cada una de las actividades, los cuales después serán parámetros de entrada de las fechas de asignación de pedidos, recepción y flujo de caja en el modelo de optimización de suministro de recursos materiales y/o energéticos.

B. Modelo de optimización para la programación del abastecimiento del proyecto

En cuanto al segundo modelo, este retoma las fechas estimadas para la iniciación y terminación de cada actividad del modelo óptimo de duración del proyecto y las incluye en una representación lineal de oferta-demanda, en el cual se consideran aspectos propios de la cadena de suministro en proyectos.

Una vez determinada la duración óptima de las actividades, a través del modelo de optimización de planeación del proyecto, el modelo descrito a continuación presenta la estrategia para realizar el suministro de materiales y otros recursos, con base en la información compartida en dos vías, desde el proyecto hacia los proveedores y viceversa.

En este aspecto, el modelo tiene como fundamentos que se conoce la duración óptima de las actividades de un proyecto para su ejecución en un plazo establecido, al igual que las cantidades de material disponible por cada proveedor durante cada periodo de la ejecución del proyecto, permitiendo la planeación óptima y anticipada del suministro de materiales, minimizando los costos de gestión de inventarios en este proceso.

1) Objetivo:

Determinar un plan de suministro de materiales y/o energía para un horizonte de planeación de un proyecto con mínimos costos en la gestión de materiales.

2) Función objetivo:

Costo total de la gestión de suministro de materiales para la ejecución de un proyecto en una duración estimada.

3) Parámetros:

C_{mkt} : Costo por unidad comercial de medida del material tipo m establecido por el proveedor comercial tipo k con pago al inicio del periodo t; Con $m=1,2,3,\dots,M$; $k=1,2,3,\dots,K$; $t=1,2,3,\dots,T$.

- π_{mt} : Costo por periodo de tiempo de retraso ocasionado por unidad comercial de medida del material tipo m no disponible en los proveedores al final del periodo t; Con $m=1,2,3,\dots,M$ $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- h_{mkt} : Costo de almacenamiento de una unidad medida del material tipo m adquirido al proveedor comercial tipo k disponible al final del periodo t; Con $m=1,2,3,\dots,M$; $k=1,2,3,\dots,K$; $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- S_{kt} : Costo de realizar y transportar un pedido de una cantidad de materiales de diferente tipo, cargado al proveedor comercial tipo k, con pago al inicio del periodo t; Con $k=1,2,3,\dots,K$; $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- R_{mt} : Cantidad de material tipo m requerido para la ejecución de actividades al inicio del periodo t; Con $m=1,2,3,\dots,M$; $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- CS_{mkt} : Capacidad disponible de suministro de material tipo m en el proveedor comercial tipo k durante el periodo t; Con $m=1,2,3,\dots,M$; $k=1,2,3,\dots,K$; $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- P_t : Flujo de caja presupuestado para cubrir costos de gestión de materiales durante el periodo t; Con $t=1,2,3,\dots,T$.

4) Variables de decisión:

- X_{mkt} : Cantidad de materiales tipo m requeridos al proveedor comercial tipo k para garantizar la ejecución de actividades del proyecto al inicio del periodo t; Con $m=1,2,3,\dots,M$; $k=1,2,3,\dots,K$; $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- F_{mt} : Nivel de faltantes de materiales tipo m para la ejecución de actividades al final del periodo t Con $m=1,2,3,\dots,M$ $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- I_{mkt} : Nivel de inventario acumulado esperado de materiales tipo m provenientes del proveedor k para la ejecución de actividades al final del periodo t Con $m=1,2,3,\dots,M$ $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.
- L_{kt} : Recepción de materiales desde el proveedor comercial tipo k para la ejecución de actividades al inicio del periodo t Con $k=1,2,3,\dots,K$ $\wedge t=1,2,3,\dots,T$.

5) Modelo matemático:

$$\begin{aligned} \text{Min } F(t) = & \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T C_{mkt} * X_{mkt} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \pi_{mt} * F_{mt} \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_{mkt} * I_{mkt} \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T S_{kt} * L_{kt} \end{aligned} \quad (10)$$

S. A:

$$X_{mkt} \leq CS_{mkt} * L_{kt} \quad \forall m = 1,2,3, \dots, M; k = 1,2,3, \dots, K; \wedge t = 1,2,3, \dots, T. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K C_{mkt} * X_{mkt} + \sum_{m=1}^M \pi_{mt} * F_{mt} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K h_{mkt} * I_{mkt} \\ + \sum_{k=1}^K S_{kt} * L_{kt} \leq P_t \quad \forall t=1,2,3, \dots, T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K I_{mkt-1} + \sum_{k=1}^K X_{mkt} + \sum_{k=1}^K I_{mkt} + F_{mt} = R_{mt} \quad \forall m = 1,2,3, \dots, M \wedge t = 0,1,2, \dots, T \quad (13)$$

$$X_{mkt}, F_{mt}, I_{mt} \geq 0 \quad (14)$$

$$L_{kt} \text{ Binaria} \quad (15)$$

La expresión matemática (10), presenta el costo total de la gestión de materiales, donde el primer término considera el costo de adquisición para el total de materiales requeridos; el segundo término considera el costo ocasionado por faltantes de materiales durante cada periodo de tiempo, como un costo de penalización por incumplimiento y desplazamiento de una unidad de tiempo de la finalización del proyecto más el costo de lucro cesante, por tener otros recursos sin utilización; El tercer término incluye costos de almacenamiento en sitio propio o en instalaciones del proveedor, que se presenta para garantizar la disponibilidad de material, debido a los fenómenos de capacidad de suministro de los proveedores; El cuarto término implica los costos de ordenar, que corresponde a la gestión administrativa de cada pedido más los costos de transporte del material, desde cada uno de los proveedores por pedido realizado en cada periodo.

En la expresión matemática (11), se representa la cantidad a pedir, de cada material, a cada proveedor, en cada periodo de tiempo, limitada a la capacidad de suministro, variedad y cantidad de los proveedores.

La expresión matemática (12), presenta la suma de costos de gestión de materiales y la restringe a un flujo de caja asignado para este propósito por cada periodo de tiempo.

En el modelo se incluye una ecuación de balance de materiales entre cada uno de los periodos, donde se tienen en cuenta los inventarios iniciales de materiales al inicio del periodo, las provisiones de materiales durante el periodo y los inventarios o faltantes al final de cada uno de los momentos de tiempo de la ejecución del proyecto, expresión (13).

Las cantidades de material en recepción, así como las cantidades en inventario o faltantes al final de cada periodo son de carácter positivo, expresión (14).

En la expresión matemática (15), se representa cada pedido como una variable binaria, donde realizar un pedido se representa con el dígito 1 y no hacerlo, con el dígito 0.

V. RESULTADOS

Una vez determinados los parámetros de entrada de los dos modelos para la optimización del abastecimiento, se realiza el proceso de compilación y algoritmia mediante el complemento Solver de Excel® en el primer caso de optimización de la programación de actividades del proyecto, al cual se desea realizar el programa de abastecimiento, así mismo, en el segundo modelo de optimización para la programación del abastecimiento del proyecto se utiliza el software *General Algebraic Modeling System* GAMS® con el cual se estiman los valores para las variables de decisiones propuestas.

C. Optimización del modelo de programación de actividades

El proyecto en análisis está compuesto por catorce actividades, en la Tabla I se presentan las actividades, la estructura de dependencia, tiempos estimados de duración, materiales requeridos y costo estimado.

Para el proyecto descrito, el análisis de estructura correspondiente es representado mediante el diagrama de red basado en actividades de la Figura 2, se evidencia que algunas actividades se pueden realizar de forma paralela para mejorar el desempeño en la ejecución del proyecto.

A partir de la aplicación del método de optimización descrito en la sección IV-A, la estimación de la duración de las actividades y del proyecto en análisis, es posible determinar que existen diez fechas relevantes de control en la ejecución del mismo, sin importar el tiempo esperado de su fin, ya que en estos eventos se inicia o termina una actividad o un conjunto de estas.

Como resultado del análisis de datos obtenido para el proyecto en referencia, este podrá realizarse en máximo 45 días, si cada actividad se lleva a cabo en su duración normal, incurriendo en un costo mínimo de \$ 1.700.000, con el detalle de duración presentado en la Tabla II.

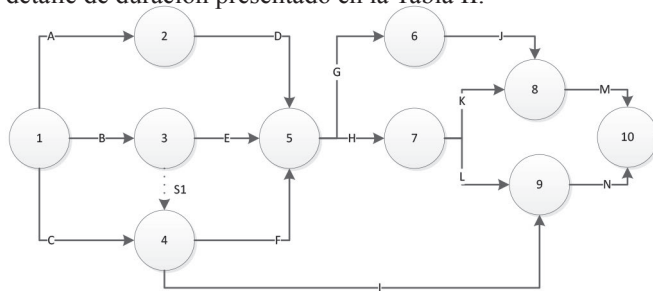


Fig. 2 Convenciones para la programación del proyecto.

TABLA II
DURACIÓN DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Actividad	Código actividad	Duración estimada
A	1-2	8
B	1-3	10
C	1-4	6
D	2-5	12
S1	3-4	0
E	3-5	6
F	4-5	4
G	5-6	8
H	5-7	3
I	4-9	7
J	6-8	9
K	7-8	8
L	7-9	10
M	8-10	5
N	9-10	12

Bajo esta duración estimada en 45 días para la ejecución del proyecto, las diez fechas de control que corresponden a cada uno de los nodos de la red, expresados en días calendario, presentan las fechas de inicio o terminación de las actividades programadas, muestran los rangos en la Tabla III, los cuales fueron obtenidos a través de análisis de sensibilidad sobre el vector de disponibilidad del modelo lineal reseñado.

TABLA I
PARÁMETROS DE ENTRADA PROGRAMACIÓN DEL PROYECTOS

Ac-ti-vidad	Dependencia	Tiempo normal (Días)	Tiempo límite (Días)	Costo normal (Miles de \$)	Costo límite (Miles \$)	Material tipo 1 (Unidades)	Material tipo 2 (Unidades)	Material tipo 3 (Unidades)
A	-	8	6	400	500	100	0	150
B	-	10	5	200	300	0	100	0
C	-	6	2	100	200	0	0	100
D	A	12	8	80	100	0	0	150
E	B	6	5	150	180	200	0	20
F	B,C	4	2	100	200	0	150	30
G	D,E,F	8	3	120	220	0	120	0
H	D,E,F	3	2	200	300	0	0	0
I	B,C	7	3	50	100	120	130	50
J	G	9	5	50	80	0	0	200
K	H	8	4	80	150	0	0	0
L	H	10	4	30	60	100	50	100
M	J,K	5	3	80	120	100	100	0
N	I,L	12	7	60	100	50	0	0
Costo total				1700	2610			

TABLA III
RANGOS DE FECHAS PARA INICIO Y FIN DE LOS EVENTOS QUE LIMITAN
CADA UNA DE LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Nodo o evento	Fecha más temprana	Fecha más tardía
1	0	0
2	8	8
3	10	14
4	10	16
5	20	20
6	28	31
7	23	23
8	37	40
9	33	33
10	45	45

A partir de la estimación de las fechas para cada evento, las actividades tendrán el cronograma de ejecución presentado en la Tabla IV para una duración de 45 días. Se determinan las actividades críticas del proyecto que no permiten retrasos en su ejecución.

D. Optimización de la programación del abastecimiento del proyecto

El modelo formulado considera que el abastecimiento de material para cada una de las actividades se presenta en el primer día programado para la realización de la actividad prevista en la planeación del proyecto, teniendo como base la disponibilidad e inventario de materiales en el proveedor y en el almacén propio del ejecutor del proyecto.

En caso contrario, de no poder contar con la totalidad de la cantidad de material en el primer día de ejecución de

la actividad, la recepción de las cantidades pendientes se programan durante los días anteriores al inicio de la actividad, garantizando de esta manera el total de material para el inicio de cada una de ellas, procurando, en lo posible, la mínima demora en cada una de las actividades del proyecto.

Este aspecto es una consecuencia de las condiciones de capacidad y demanda de recursos del proyecto, ocasionando implicaciones en costos de almacenamiento y gestión de inventarios con antelación al inicio de la ejecución de cada actividad, pero asegurando el suministro de materiales en todas las actividades del proyecto.

Se considera en el modelo de programación de suministro un día crítico, aquella fecha en la cual se prevé en la planeación del proyecto la recepción de material de cualquier tipo, con su correspondiente pago contra entrega, la cual es la segunda consideración del modelo formulado, el cual permite la creación de un flujo de caja para la adquisición de materiales de forma adecuada, presentando avances de ejecución presupuestal antes de las actividades, con el fin de garantizar el suministro de materiales.

1) Programación del abastecimiento

El resultado de modelo acerca del plan de suministro se presenta en la Tabla V, en la cual se detalla la cantidad de material esperado por ingreso en cada día del proyecto. Para tal efecto, el plan de recepción de materiales detalla los tiempos en los cuales habrá recepción de los diferentes tipos de materiales, así como el proveedor de origen con el cual se garantiza el mínimo costo de compra durante los periodos de ejecución del proyecto.

TABLA IV
RESULTADOS DEL PRIMER MODELO DE OPTIMIZACIÓN EN DURACIÓN Y TIPO DE ACTIVIDAD, PARA CADA ETAPA DEL PROYECTO

Actividad	Dependencia	Duración estimada	Incremento lineal de costo	Iniciación más temprana	Iniciación más tardía	Finalización más temprana	Finalización más tardía	Tipo de actividad
A	-	8	50	0	0	8	8	Crítica
B	-	10	20	0	0	10	14	No crítica
C	-	6	25	0	0	10	16	No crítica
D	A	12	5	8	8	20	20	Crítica
E	B	6	30	10	14	20	20	No crítica
F	B,C	4	50	10	16	20	20	No crítica
G	D,E,F	8	20	20	20	28	31	No crítica
H	D,E,F	3	100	20	20	23	23	Crítica
I	B,C	7	12.5	10	16	33	33	No crítica
J	G	9	7.5	28	31	37	40	No crítica
K	H	8	17.5	23	23	37	40	No crítica
L	H	10	5	23	23	33	33	Crítica
M	J,K	5	20	37	40	45	45	No crítica
N	I,L	12	8	33	33	45	45	Crítica

TABLA V
PROGRAMACIÓN DEL ABASTECIMIENTO EN DETALLE POR TIPO DE MATERIAL, PROVEEDOR Y DÍA DE RECEPCIÓN EN EL PROYECTO

		Cantidades de material programadas de suministro por día crítico (Unidades de medida/día)														
		Día														
Tipo de material	Proveedor	0	7	8	9	10	19	20	22	23	27	28	33	36	37	
M1	P1	50	50	50	50	50			20	50			50	20	50	
M1	P2	30	30	30	30	30				30					30	
M1	P3	20														
M2	P1	30	30	30	30	30	30	30		30				20	30	
M2	P2	20	10	20	20	20		20							20	
M2	P3	30		30	30	30	10	30		20					30	
M3	P1	100		20												
M3	P2	80		80		80				50	70	80				
M3	P3	50		50		20				50		50				

2) Programación del Flujo de caja

En la Tabla VI se muestra el flujo de caja destinado al pago de proveedores, contra entrega de materiales por cada día, en la cual se totalizan los flujos de caja por día y la forma en la cual se distribuye este dinero entre los diferentes proveedores.

De igual manera esta programación indica la cantidad de dinero que se requiere para compras a través del tiempo, mostrando de manera simple el flujo de caja del proyecto.

3) Programación de recepciones e inventario

El programa de suministro obtenido por el modelo de optimización incluye decisiones acerca de cuándo se espera contar con una recepción planeada de material y su

contabilización como inventario disponible de material; por tanto, esta planeación comprueba cómo el modelo efectúa el abastecimiento antes de la iniciación de la fecha de inicio de cada actividad para cumplir con el supuesto declarado de la optimización de inicio de actividades con todo el material disponible para su realización, generando un incremento en el inventario disponible antes de la fechas de inicio de estas.

Adicionalmente, es posible contemplar que estas llegadas programadas de material se pueden realizar hacia almacenes propios de la firma ejecutora del proyecto o pueden administrarse desde la perspectiva de manejo de inventario en el proveedor bajo un esquema *Vendor Managed Inventory* VMI [21], lo cual implica una planeación de almacén como ventaja para el tomador de decisiones, tal como se presenta en la Tabla VII.

TABLA VI
PROGRAMACIÓN DEL FLUJO DE CAJA POR DÍA, DISCRIMINADO POR PROVEEDOR Y PAGO DE CADA TIPO DE MATERIAL

		Cantidad de capital a invertir por pago de materiales a cada proveedor en cada periodo de tiempo (Miles de pesos * Proveedor/Día)													
Tipo material	Proveedor	Días													
		0	7	8	9	10	19	20	22	23	27	28	33	36	37
M1	P1	2445	2445	2445	2445	2445	0	0	980	2450	0	0	2450	980	2450
M1	P2	1464	1464	1464	1464	1464	0	0	0	1485	0	0	0	0	1485
M1	P3	980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	P1	825	825	825	825	825	825	825	0	825	0	0	0	550	825
M2	P2	570	285	570	570	570	0	600	0	0	0	0	0	0	600
M2	P3	828	0	828	828	828	276	828	0	552	0	0	0	0	885
M3	P1	3140	0	628	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M3	P2	2480	0	2480	0	2480	0	0	0	1600	2240	2560	0	0	0
M3	P3	1525	0	1525	0	630	0	0	0	1575	0	1575	0	0	0
Flujo de caja para P1 (Miles \$/día)		6410	3270	3898	3270	3270	825	825	980	3275	0	0	2450	1530	3275
Flujo de caja para P2 (Miles \$/día)		4514	1749	4514	2034	4514	0	600	0	3085	2240	2560	0	0	2085
Flujo de caja para P3 (Miles \$/día)		3333	0	2353	828	1458	276	828	0	2127	0	1575	0	0	885
Flujo de caja Total (Miles \$/ día)		14257	5019	10765	6132	9242	1101	2253	980	8487	2240	4135	2450	1530	6245
Total pagos Proyecto (Miles de \$)		74836													

TABLA VII
PROGRAMACIÓN DE RECEPCIONES E INVENTARIO PROGRAMADO

Tipo de material (Unidades/día)	Días						
	7	8	9	19	22	27	36
M1	80	160	240		20		20
M2	40	120	200	40			20
M3						70	
Costo de mantenimiento de inventario (Miles \$/día)	Días						
	7	8	9	19	22	27	36
M1	780.8	1561.6	2342.4	0	196	0	196
M2	220	660	1100	220	0	0	110
M3	0	0	0	0	0	439.6	306
Costo total por inventarios (Miles \$/día)	100.8	2221.6	3442.4	220	196	439.6	306
Costo total por mantenimiento de inventarios en el proyecto (Miles de pesos/Proyecto)	7826.4						

4) Programación de pedidos a cada proveedor

Con relación a la programación de pedidos, la información se muestra en la Tabla VIII, donde cada elemento marcado con el número 1 muestra un pedido por proveedor en una fecha indicada y planeada con antelación para ello. Este programa surge del modelo de optimización, el cual empleó

para este aspecto unos costos de ordenar, correspondientes a gastos administrativos, operacionales y de transporte, para los diferentes pedidos de materiales en cada periodo de tiempo, logrando los resultados de flujo de caja por este concepto mostrado en la Tabla IX.

TABLA VIII
PROGRAMACIÓN DE PEDIDOS EN EL HORIZONTE DE PLANEACIÓN A CADA PROVEEDOR

Proveedor	Selección de Proveedor													
	Día													
	0	7	8	9	10	19	20	22	23	27	28	33	36	37
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1
P2	1	1	1	1	1		1		1	1	1			1
P3	1		1	1	1	1	1		1		1			1

TABLA IX
COSTOS DE LA GESTIÓN DE PEDIDOS EN EL HORIZONTE DE PLANEACIÓN CANCELADOS A CADA PROVEEDOR

Proveedor	Costo de ordenar por periodo de tiempo (miles de pesos/Proveedor/Día)													
	Día													
	0	7	8	9	10	19	20	22	23	27	28	33	36	37
P1	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0	0	45	45	45
P2	105	105	105	105	105	0	105	0	105	105	105	0	0	105
P3	95	0	95	95	95	95	95	0	95	0	95	0	0	95
Costo de ordenar por periodo (Miles \$/día)	245	150	245	245	245	140	245	45	245	105	200	45	45	245
Total costo del ordenar proyecto (Miles de pesos/Proyecto)	2445													

Finalmente, el análisis del proyecto realizado muestra un flujo de caja consolidado por fechas críticas del mismo, donde es posible observar cómo se discrimina y bajo qué conceptos se presentan estos pagos, lo cual contribuye a la organización de los diferentes costos de la gestión de aprovisionamiento de materiales para el proyecto.

También se puede ver que el modelo contempla los costos clásicos de la literatura en la gestión de aprovisionamiento de materiales para otro tipo de industrias, los cuales se distribuyen en el costo de adquisición del material, el costo de mantenimiento de inventario, el costo de realizar pedidos y el flujo total como se presenta en la Tabla X

TABLA X
COSTOS TOTALES DE LA GESTIÓN DE ABASTECIMIENTO PARA EL PROYECTO OPTIMIZADO

Día	Flujo de caja por compra (miles de \$/día)	Flujo de caja por mantenimiento de inventario (miles de \$/día)	Flujo de caja por faltantes (miles de \$/día)	Flujo de caja para pedidos (miles de \$/día)	Flujo de caja total por periodo (miles de \$/día)
0	14257		43800	245	58302
7	5019	1000.8		150	6169.8
8	10765	2221.6		245	13231.6
9	6132	3442.4		245	9819.4
10	9242			245	9487
19	1101	220		140	1461
20	2253			245	2498
22	980	196		45	1221
23	8487			245	8732
27	2240	439.6		105	2784.6
28	4135			200	4335
33	2450			45	2495
36	1530	306		45	1881
37	6245			245	6490
Totales	74836	7826.4	43800	2445	128907.4

VI. DISCUSIÓN

Las fechas establecidas en el primer modelo corresponden a los momentos críticos de control del proyecto frente al suministro de materiales. Para cada una de las fechas debe garantizarse la totalidad de los materiales requeridos por actividad. Las cantidades de material, que por coordinación de inventarios con los proveedores, se espera tener en recepción para atender periodos de tiempo posterior, generan un costo adicional.

Dentro de los resultados se observa que el total de inventarios en el proyecto es de 1010 unidades, de los cuales el material M1 representa el 51,5%, M2 el 41,6% y M3 el 6,9%. Estos porcentajes permiten suponer estrategias de abastecimiento para proyectos que requieran este tipo de recursos.

A partir de estos resultados, el costo por almacenamiento y gestión de inventarios es de \$7.826.400 pesos. Se estima que este valor corresponde a cerca del 20% del costo del material promedio por día por proveedor, el valor del parámetro de costo incluye los cargos de almacenamiento, manejo y manipulación del material, así como un porcentaje de costo de oportunidad por rendimiento financiero.

La cantidad de faltantes estimada con el modelo de suministro para el proyecto en análisis muestra que los requerimientos no satisfechos se presentan en los materiales tipo 2 y 3 con 20 unidades de medida a un costo de \$1.095.000 de pesos por cada uno, lo que corresponde a un total de \$43.800.000 de pesos al inicio del proyecto.

Esto indica una deficiente capacidad de los proveedores que no se puede satisfacer con inventarios con antelación, el cual puede ser resuelto mediante la búsqueda de nuevos proveedores o simplemente al realizar una nueva negociación con los proveedores actuales, para ampliar su capacidad

por esta única vez de acuerdo a las normas de negociación referenciadas en la literatura.

Aunque el nivel de faltantes proyectado no está afectando el tiempo total del proyecto, se constituye un factor de riesgo de aprovisionamiento, que puede generar un efecto negativo en retrasos y sobrecostos operacionales.

La realización de los pedidos programados a todos los proveedores, genera un costo de \$2.445.000 pesos, lo que representa el 23,8% del costo logístico de la operación del proyecto.

En el flujo de caja consolidado resulta que el costo mínimo para la gestión de abastecimiento de los materiales tipo M1, M2 Y M3 es de \$128.907.400, para una duración total de ejecución del proyecto de 45 días.

VII. CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Los mecanismos de coordinación de información compartida en las RSP, permiten establecer planes de abastecimiento mediante técnicas de optimización en proyectos

RCPSP, a partir de la información de proveedores sobre capacidad y disponibilidad de recursos en el horizonte de planeación del proyecto.

La proyección de los flujos de recursos, corresponde a gastos operacionales y costos de gestión de abastecimiento, permitiendo establecer planes óptimos de pedido y pago de proveedores.

Es posible encontrar nuevos programas de abastecimiento con la metodología propuesta, con solo variar la duración total del proyecto, al realizar trueques entre costo-tiempo, de acuerdo a las necesidades de los usuarios o del ejecutor del proyecto, lo cual hace versátiles y adaptables los modelos propuestos por los autores para la solución del caso.

Para futuras investigaciones se recomienda evaluar estrategias de coordinación intra-organizacionales multi-proyecto para las PBO que pueden compartir recursos entre proyectos y que desarrollen mecanismos de información compartida con proveedores. Para la efectividad de los mecanismos de coordinación, así mismo, investigar sobre la aplicación de mecanismos contractuales en las RSP.

REFERENCIAS

- [1] P. Eriksson, «Partnering in engineering projects: Four dimensions of supply chain integration,» *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 21, n° 1, pp. 38-50, 2014.
- [2] P. Behera, R. P. Mohanty, and A. Prakash, «Production Planning & Control Understanding Construction Supply Chain Management Understanding Construction Supply Chain Management,» *Production Planning & Control*, vol. 2616, no. May, pp. 1332-1350, 2015.
- [3] D. Aloini, R. Dulmin, V. Mininno y S. Ponticelli, «Key antecedents and practices for Supply Chain Management adoption in project contexts,» *International Journal of Project Management*, vol. 33, n° 6, pp. 1301-1316, 2015
- [4] S. Sedita y R. Apa, «The impact of inter-organizational relationships on contractors' success in winning public procurement projects : The case of the construction industry in the Veneto region,» *International Journal of Project Management*, vol. 33, n° 7, pp. 1548-1562, 2015.
- [5] S. Lu y H. Yan, «A model for evaluating the applicability of partnering in construction,» *International Journal of Project Management*, vol. 25, n° 2, pp. 164-170, 2007.
- [6] A. Abd Shukor, M. Fadhil Mohammad y R. Mahbub, «Supply chain integration challenges in project procurement in Malaysia: IBS contractors' perspective,» de *Management and Innovation for a Sustainable Built Environment*, Amsterdam; Netherlands, 2011.
- [7] X. Xue, Y. Wang, Q. Shen y X. Yu, «Coordination mechanisms for construction supply chain management in the Internet environment,» *International Journal of Project Management*, vol. 25, n° 2, pp. 150-157, 2007.
- [8] S. Chopra y P. Meindl, *Supply Chain Management. Strategy, Planning and Operation*, Boston; USA: Prentice Hall, 2012.
- [9] M. H. Mello, J. Gosling, M. M. Naim, J. O. Strandhagen, and P. O. Brett, «Improving Coordination in an Engineer-to-Order Supply Chain Using a Soft Systems Approach,» *International Journal of Logistics Management*, vol. 7287, no. May, pp. 1-19, 2012.
- [10] X. Fu, M. Dong, and G. Han, «Coordinating a trust-embedded two-tier supply chain by options with multiple transaction periods,» *International Journal of Production Research*, vol. 7543, no. May, pp. 1-15, 2017.
- [11] J. Hazra y B. Mahadevan, «Supply Chain Management. Strategy, Planning and Operation,» *European Journal of Operational Research*, vol. 193, n° 1, pp. 303-316, 2009.
- [12] K. P. Salas, «Modelo de la cadena de abastecimiento del sector madera y muebles de la Región Caribe de Colombia,» *Entre Ciencia e Ingeniería*, no. 14, pp. 38-49, 2013.
- [13] K. Inderfurth, P. Kelle y R. Kleber, «Dual sourcing using capacity reservation and spot market: Optimal procurement policy and heuristic parameter determination,» *European Journal of Operational Research*, vol. 225, n° 2, pp. 298-309, 2013.
- [14] Y. Zhao, L. Ma, G. Xie y T. Cheng, «Coordination of supply chains with bidirectional option contracts,» *European Journal of Operational Research*, vol. 229, n° 2, pp. 375-381, 2013.
- [15] M. Tavana, A. Abtahi y K. Khalili-Damghani, «A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time-cost-quality trade-off project scheduling problems,» *Expert Systems with Applications*, vol. 41, n° 4, pp. 1830-1846, 2014.
- [16] P. Brucker, A. Drexl, M. Rolf, E. Pesch y K. Neumann, «Resource constrained project scheduling : Notation, classification, models, and methods,» *European Journal of Operational Research*, vol. 112, n° 1, pp. 3-41, 1999.
- [17] B. Abbasi, S. Shadrokh y J. Arkat, «Bi-objective resource-constrained project scheduling with robustness and makespan criteria,» *Applied Mathematics and Computation*, vol. 180, n° 1, pp. 146-152, 2006.
- [18] M. Al-Fawzan y M. Haouari, «A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling,» *International Journal of Production Economics*, vol. 96, n° 2, pp. 175-187, 2005.
- [19] A. Elimam y B. Dodin, «Project scheduling in optimizing integrated supply chain operations,» *European Journal of Operational Research*. Vol. 224 n° 3, pp. 530-541, 2013.
- [20] D. Kalenatic, «Técnicas de Planeación de Redes,» Bogotá; Colombia: Fondo de Publicaciones Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1993.
- [21] L. Zhang, J. Chen y Y. Ma, «The relationship between the system cost and the bullwhip effect in time-based VMI consolidation replenishment system,» *International Technology and Innovation Conference*, China, 2006.

Juan Pablo Zamora Aguas. Docente Investigador tiempo completo. Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. Ingeniero Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. MSc. en Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Jair Eduardo Rocha González. Docente investigador Tiempo Completo, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. Docente Cátedra Planta, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Ingeniero Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. MSc. en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Wilson Adarme Jaimes. Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Ingeniero Industrial, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Especialista en Ingeniería de Producción. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. MSc. en Ingeniería y Logística, Universidad del Valle, Colombia. PhD. En Ingeniería, Industria y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.