

# Supply Scheduling in Projects through Dynamic Batch Methods.

Jair E. Rocha González, M.Sc.<sup>1</sup>, Juan Pablo Zamora Aguas, M.Sc.<sup>1</sup>, and Carlos Andrés Arango Londoño, M.Sc.<sup>1</sup> <sup>1</sup>Universidad de La Salle, Colombia, jerocha@unisalle.edu.co, jpzamora@unisalle.edu.co, cararango@unisalle.edu.co

*Abstract– This paper shows the application of “Wagner-Whitin”*

*algorithm, that seeks to find the best inventory restocking in a Project-based system. The capacity and supply cost parameters by type of material is considered. The model reduces supply costs and ensures the availability of materials at each stage of the project. The planning of engineering project activities and material requirements are used as input data. The combined algorithm is applied, resulting in the lowest system cost, and the scheduling of supplies by the provider for each required period.*

*Keywords – Provisioning, Projects, Supply Chain, Logistics.*

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.318>

**ISBN:** 978-0-9822896-9-3

**ISSN:** 2414-6390

# Programación de Abastecimiento de Materiales en Proyectos mediante Métodos de Lote Dinámico.

Jair Eduardo Rocha González, M.Sc.<sup>1</sup>, Juan Pablo Zamora Aguas, M.Sc.<sup>1</sup>, y Carlos Andrés Arango Londoño, M.Sc.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidad de La Salle, Colombia, jerocha@unisalle.edu.co, jpzamora@unisalle.edu.co, cararango@unisalle.edu.co

*Resumen– El artículo presenta la aplicación combinada del algoritmo Wagner-Whitin para la definición de la política de reposición de inventarios en un sistema de operación basado en proyectos, integrando los niveles de capacidad y los costos del proveedor por tipo de material para reducir los costos logísticos de abastecimiento y garantizar la disponibilidad de materiales en cada etapa del proyecto. Se utilizan como datos de entrada la programación de las actividades de un proyecto de ingeniería, con los requerimientos de materiales. Se aplica el algoritmo combinado de lo cual se obtiene el nivel óptimo de costos del sistema, y la programación del abastecimiento por fuente de suministro para cada periodo requerido.*

*Palabras Clave– Abastecimiento, Inventarios, Proyectos, Cadena de suministro, Logística.*

## I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de las empresas basadas en proyectos, la programación del abastecimiento de materiales y servicios debe considerar las características de cada proyecto, las especificaciones técnicas y de diseño, las condiciones de temporalidad y la definición de las etapas para su ejecución [1].

La definición de políticas de suministro considera entre otros aspectos los requerimientos en términos de demanda por periodo de tiempo [2], en este sentido la técnica de programación a utilizar en el proceso de abastecimiento se selecciona de acuerdo al patrón de demanda presente.

Un determinante en la política de gestión de inventarios en las organizaciones basadas en proyectos es el tipo de materiales a utilizar por proyecto [3]. La política seleccionada es diferente para los materiales que se requieren continuamente y en volúmenes predecibles, independiente del proyecto a fabricar, que para los materiales especiales o de diseño exclusivos para las especificaciones particulares del proyecto.

Una situación particular en proyectos, tiene que ver con las limitaciones de tiempo para la estimación de los recursos necesarios del proyecto [4].

Una causa común de los problemas de calidad y cantidad en la recepción de pedidos se relaciona con el traslape de las etapas de diseño con las etapas de producción en el desarrollo de los proyectos. En este sentido se deben implementar estrategias de planificación y programación para la toma de decisiones en el suministro de forma oportuna y racional.

Se utiliza como técnica los métodos de lote dinámico con el algoritmo Wagner-Whitin para programar el abastecimiento por tipo de materiales en los periodos de tiempo del proyecto, considerando los requerimientos de recursos por proyecto, las capacidades disponibles de los proveedores de la red de suministro y los costos asociados.

## II. DETERMINACIÓN DE DEMANDA IRREGULAR EN EL ABASTECIMIENTO DE MATERIALES

La determinación del comportamiento irregular para el abastecimiento, es un proceso en el cual se establece un patrón de demanda que aunque es conocido no conserva un valor constante en el tiempo, caso típico de los proyectos en los cuales se conoce con antelación la demanda de materiales para realizar cada una de las actividades, pero estas se concentran al inicio de cada actividad.

Por tanto, el uso de técnicas estadísticas se hace imprescindible para comprobar las características propias de este tipo demanda irregular y determinística. Para lograr este objetivo de verificación del supuesto referido, se utiliza la prueba de Peterson – Silver, la cual considera una medición de la variabilidad de la demanda, a través de un análisis y comparación de la suma de cuadrados en la colección de datos de la demanda. De esta manera, la prueba estadística de Peterson – Silver describe la forma de estimación de este coeficiente de variabilidad tal como se presenta en (1). Obteniendo dos contrastes de decisión frente a su resultado [5] [6].

$$V = \frac{n \sum_{t=1}^n D_t^2}{[\sum_{t=1}^n D_t]^2} - 1. \quad (1)$$

Donde,

Dt: Es la demanda pronosticada para un periodo de tiempo t,  
n: El horizonte de planeación o tamaño de la colección de datos.

Una vez estimado el valor del coeficiente de variabilidad es posible determinar dos posibles cursos de acción, definidos en (2) y (3).

$$\text{Si } V < 0.25. \quad (2)$$

$$\text{Si } V \geq 0.25. \quad (3)$$

En el primer curso de acción, la demanda es determinística y se sugiere el uso de EOQ (*Economic Order Quantity*).

En el segundo curso de acción, la demanda es irregular y se sugiere el uso de un modelo de tamaño de lote dinámico.

### III. ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE LOTE DINÁMICO POR MEDIO DEL ALGORITMO WAGNER – WHITIN

Una vez se ha determinado un patrón de comportamiento irregular y determinístico en las demandas de materiales, es necesario la fijación de un tamaño de lote dinámico, para este propósito una de las opciones disponibles es el método de Wagner–Whitin, el cual es utilizado en la obtención de soluciones óptimas con una política de mínimo costo de gestión en el aprovisionamiento [7].

Este método busca la minimización de los costos fijos de pedido con un solo proveedor y los costos variables de mantener inventario. Se emplea la notación descrita por autores como Sipper & Bulfin, para el cálculo de todas las posibles alternativas de gestión de materiales entre un periodo de pedido y periodos de consumo [6, 7].

$$K_{tl} = A + h \left[ \sum_{j=t+1}^l (j - t) D_j \right] \quad (4)$$

$$t = 1, 2, 3 \dots T; l = t + 1, t + 2, \dots, T$$

Donde:

K<sub>tl</sub>: Costo total de inventario pedido en el periodo t para consumo en el periodo l.

A: Costo de pedido para el proveedor definido del proyecto.

h: Costo de mantener una unidad en inventario del proyecto.

D<sub>j</sub>: Demanda pronosticada para un periodo de tiempo j.

t: Periodo de pedido de material al proveedor.

l: Periodo de consumo del material en el proyecto.

Con la ecuación anterior es posible el cálculo del costo total de la gestión de inventarios para todas las posibles combinaciones entre los periodos de pedidos y consumo. Cuando se inicia el cálculo en un nuevo periodo de pedido para todas las opciones de consumo es necesario realizar la modificación de cálculo del costo a partir de (5).

$$K_l^* = \min_{t=1,2,\dots,l} \{K_{t-1}^* + K_{tl}\} \quad l = 1, 2, \dots, T. \quad (5)$$

Donde: K<sub>T</sub><sup>\*</sup> es el valor de la solución de mínimo costo.

### IV. PARÁMETROS DE ENTRADA DEL PROYECTO

El proyecto en análisis está integrado por catorce actividades a las cuales se les asignó un código, condiciones de precedencia, tiempos estimados de duración con carácter determinístico, tres tipos de materiales críticos en la gestión y el costo estimado por uso de recursos necesarios diferentes al requerimiento de materiales durante el desarrollo del proyecto, información detallada en la tabla 1 del documento.

Es necesario anotar que las unidades naturales de medida para el proyecto en estudio son, en tiempo los días de duración, en costo miles de pesos colombianos, y en la gestión de pedidos de los materiales unidades de presentación para compra.

TABLA 1  
DATOS DE PRECEDENCIA, COSTO, DURACIÓN Y MATERIAL ASOCIADOS AL PROYECTO EN ANÁLISIS

Actividad	Dependencia	Tiempo normal (Días)	Tiempo límite (Días)	Costo normal (Miles de \$)	Costo límite (Miles de \$)	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				1,700	2,610			

Como resultado de la fase anterior, la red de actividad es sometida a un proceso de optimización a través de la técnica de minimización paramétrica [8], con la cual fue posible la obtención de las fechas de iniciación y finalización más tempranas y tardías, y la definición del tipo de actividad, según se presenta en la tabla 2. Estos resultados corresponden a la fase de planeación de proyectos de la investigación.

TABLA 2  
ACTIVIDADES CRÍTICAS DEL PROYECTO

Actividad	Dependencia	Duración estimada	Incremento lineal 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

#### V. DETERMINACIÓN DEL PATRÓN DE DEMANDA EN LOS MATERIALES DEL PROYECTO

En este ámbito, la demanda de materiales en el proyecto tal como se proyectaba antes del estudio a partir de un análisis intuitivo, posee un comportamiento irregular, el cual fue comprobado mediante un análisis de datos a través de la técnica de Peterson – Silver.

Para este efecto se analiza el comportamiento del abastecimiento de materiales del proyecto el cual se realiza acorde a la siguiente regla simple de decisión: antes del inicio de cada actividad se realiza una orden de pedido, la cual arriba al proyecto en la fecha de inicio respectiva, esto con el fin de garantizar las existencias necesarias para iniciar cada una de las actividades.

Lo anterior hace que los periodos de arribo bajo una orden de arribo en el modelo coincidan generando un dato de demanda, el cual ingresará a la colección de datos con parámetros de cantidad requerida y tiempo en el cual es requerido.

Una vez se colectó esta información se procedió a realizar el análisis estadístico de cada una de las series de datos correspondientes de cada una de las demandas de los materiales, encontrando los resultados que se presentan en la tabla 3.

La duración total del proyecto en estudio corresponde a 45 días estimados, periodo en el que se realiza un mayor control a las actividades con código A, D, H, L y N, que corresponden a actividades de ruta crítica, las cuales ante cualquier retraso ocasionaran la ampliación de la terminación del proyecto, factor indeseable en el desarrollo del proyecto.

TABLA 3  
ESTIMADORES DE VARIABILIDAD DE LA DEMANDA EN LOS TRES TIPOS DE MATERIALES DEL PROYECTO

Material	Estimación del parámetro	Conclusión
M1	V = 12.253	Las demandas son irregulares, es factible usar un modelo de lote dinámico en los tres tipos de material.
M2	V = 11.280	
M3	V = 9.1953	

Los resultados anteriores permiten concluir de manera inequívoca que las demandas de los tipos de materiales requeridos en el proyecto tienen un comportamiento irregular y determinístico, en el cual es posible aplicar un modelo de abastecimiento con lote dinámico.

#### VI. RESULTADOS POLÍTICA DE INVENTARIOS UTILIZANDO WAGNER-WHITIN

Para la construcción de la política, se utiliza como insumo los pedidos provenientes de la red reseñada y de la estimación del coeficiente de variabilidad de la demanda, con los cuales es posible la implementación de una política óptima con el método de Wagner-Whitin.

Con base en la información proporcionada en cuanto a costos de mantenimiento, pedido y capacidad de los diferentes proveedores, se establecen las siguientes reglas simples de asignación: asignación en cada periodo de la mayor cantidad de material al proveedor con menos costo disponible y, oferta disponible del material. El proceso continua hasta completar el requerimiento.

Una vez considerada esta asignación, las reglas simples muestran la flexibilización del modelo de Wagner–Whitin para la situación de proyectos, en las cuales en caso de poseer un requerimiento mayor a la oferta conjunta de los proveedores se realiza un pedido en los periodos anteriores al proveedor con menor costo, incurriendo en el costo de mantenimiento de inventario hasta completar el requerimiento para el día de inicio de las actividades.

En otro caso, en el cual el requerimiento de material supere la capacidad conjunta de los proveedores pero no exista la posibilidad de realizar pedidos en periodos anteriores a un proveedor, se realiza el abastecimiento en los periodos posteriores, seleccionando al proveedor con costo de pedido y envío más bajo, realizando un ajuste en el consumo de materiales, asignando el disponible de estos a las actividades críticas y los pedidos diferidos a las actividades no críticas, aprovechando para ello los tiempos de holgura de este tipo de

actividades, situación que no afecta la duración total del proyecto.

Los resultados de la programación de suministro se observan en la tabla 4, en la cual se describe las cantidades de material en unidades de medida que deben ser pedidos en cada uno de los periodos del horizonte de planeación del proyecto a cada proveedor de tres disponibles para el suministro de materiales.

Estos proveedores presentan como característica una capacidad limitada de oferta de los materiales, por lo cual no es posible cumplir el requerimiento inicial de material tipo 2 existiendo un faltante igual a 20 unidades, las cuales se reponen en el periodo siguiente por parte del proveedor 1, generando una situación de abastecimiento con demanda diferida que no genera inconvenientes en el desarrollo de las actividades planeadas.

TABLA 4.  
CANTIDAD DE MATERIAL PROGRAMADA DE SUMINISTRO POR DÍA CRÍTICO (UNIDADES)

Material	Proveedor	Día														
		0	1	7	8	9	10	19	20	22	23	27	28	33	36	37
M1	P1			50	50	50	50			20	50			50	20	50
M1	P2			30	30	30	30				30					30
M1	P3	100														
M2	P1	30	20	30	30	30	30	30	30		30				20	30
M2	P2	20			20	20	20		20		20					20
M2	P3	30		10	30	30	30	10	30							30
M3	P1	100			100											
M3	P2							80			80	70	80			
M3	P3				50			20			20					

Se presentan pedidos en la solicitud de materiales entre los días 7 a 10, 20 a 23 y 36 a 37. El proveedor 1 es el líder de los proveedores con 21 pedidos (45%) equivalentes a 900 unidades (47% del total), donde el objetivo del modelo fue minimizar los costos de producción.

Los costos de las ordenes programadas para cada material en cada proveedor se enuncian en las tablas 5, 6 y 7, donde se evidencia un aumento de los costos de pedido y envío en cuanto a los materiales tipo 2 y 3, los cuales tienen un mayor número de pedidos atribuibles a la escasa capacidad de los proveedores.

TABLA 5  
COSTO DE ORDENAR EL MATERIAL TIPO 1

Proveedor	Día									
	0	7	8	9	10	22	23	33	36	37
P1		45	45	45	45	45	45	45	45	45
P2		45	45	45	45		45			45
P3	45									

TABLA 6  
COSTO DE ORDENAR EL MATERIAL TIPO 2

Proveedor	Día										
	0	1	7	8	9	10	19	20	23	36	37
P1	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
P2	105			105	105	105			105	105	105
P3	105		105	105	105	105	105	105			105

TABLA 7  
COSTO DE ORDENAR EL MATERIAL TIPO 3

Proveedor	Día					
	0	8	10	23	27	28
P1	95	95				
P2				95	95	95
P3		95	95	95		95

En la tabla 8 se presenta el resumen de las cantidades a almacenar de cada material resultado del proceso de

planeación en la gestión de inventarios, de igual manera la tabla 9 presenta los costos de almacenamiento e inventario que se generan en el sistema.

TABLA 8  
CANTIDAD ESPERADA DE MATERIALES ALMACENADOS POR PERIODO DE TIEMPO

Tipo Material	Días						
	7	8	9	19	22	27	36
M1	80	160	240		20		20
M2	40	110	160	40			20
M3							70

TABLA 9  
COSTOS DE ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE INVENTARIOS

Tipo de Material	Día						
	7	8	9	19	22	27	36
M1	781.8	1,564	2,345		196		196
M2	279	558	837	220.2			110
M3							448
Costo día	1,061	2,122	3,182	220.2	196	448	306
Costo total Inventarios							\$ 7,535

## VII. CONCLUSIONES

El material tipo 1 evidencia ser el 35% del total del material solicitado con 670 unidades, al igual que tan solo el 21% de los costos de envío con 950,000 pesos, mientras para el material tipo 2 se realizan pedidos por 650 unidades con costos de pedido y envío equivalentes al 62% del total con 2,730,000 de pesos en esta actividad.

En general, al realizar un análisis con el mismo modelo de Wagner – Whitin sin considerar la capacidad de oferta de los proveedores, presenta una mejor opción en relación a costos, ya que privilegia el almacenamiento sobre la realización de pedidos, generando inferiores costos de gestión de inventario y materiales.

Al ser comparado con el modelo presentado desprecia el supuesto de capacidad de los proveedores fundamento del presente artículo de investigación, donde se muestra una acumulación durante los periodos 7 al 9 en los materiales 2 y 3 para ser liberados al final de estos en las actividades programadas con inicio en estos periodos, caso que también se presentan en los días 19, 22, 27 y 36 con todos los materiales.

Por tanto, la aplicación del modelo de Wagner – Whitin relajado para la situación de proyectos presenta menores niveles de inventario de los materiales, generando un mejor desempeño de los costos, donde se presenta un consolidado de

los costos de pedido y envío más los costos de mantener inventario en los periodos donde estos existen.

De esta manera, los flujos de dinero se presentan de forma direccionada por cada tipo de material por periodo de tiempo, proporcionando una mejor planeación de este recurso destinado al pago de proveedores, distribuyendo las cuantías en costos de envío con una suma de \$ 4,400,000 de pesos colombianos distribuidos en 49 envíos y un costo de mantener inventario que asciende al 63% de los costos totales de la gestión de inventarios tasados en \$7,535,000 de pesos colombianos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Aloini, R. Dulmin, V. Mininno y S. Ponticelli, «Key antecedents and practices for supply chain management adoption in projects context,» *Journal Project Management*, vol. 33, n° 6, pp. 1301-1316, 2015.
- [2] R. Ballou, *Logística, Administración de la cadena de suministro*, Ciudad de Mexico, Mexico: Pearson, 2004.
- [3] X. Xue, Q. Shen, Y. Tan, Y. Zhang y H. Fan, «Comparing the value of information sharing under different inventory policies in construction supply,» *Journal Project Management*, vol. 29, n° 7, pp. 867-876, 2010.
- [4] T. Ala-Risku, J. Collin, J. Holmström y J. Vuorinen, «Site inventory tracking in the project supply chain: problem description and solution proposal in a very large telecom project,» *Supply Chain Management International Journal*, pp. 252-260, 2010.
- [5] R. Peterson y E. Silver, *Decision Systems for Inventory Management and Production Planning*, New York, EEUU: Wily and Sons, 1979.
- [6] D. Sipper y R. Bulfin, *Planeacion y control de la produccion*, Ciudad de Mexico: Mc GRaw Hill, 1998.
- [7] H. Warner y T. Whitin, «Dynamic version of the Economic Lot Size Model,» *Management Science*, vol. 5, n° 1, pp. 89-96, 1958.
- [8] D. Kalenatic, *Técnicas de Planeacion de Redes*, Bogotá D.C.; Colombia: Fondo de Publicaciones Universidad Distrital, 1993.

# Programación de Abastecimiento de Materiales en Proyectos mediante Métodos de Lote Dinámico.

Jair Eduardo Rocha González, M.Sc.<sup>1</sup>, Juan Pablo Zamora Aguas, M.Sc.<sup>1</sup>, y Carlos Andrés Arango Londoño, M.Sc.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidad de La Salle, Colombia, jerocha@unisalle.edu.co, jpzamora@unisalle.edu.co, cararango@unisalle.edu.co

*Resumen– El artículo presenta la aplicación combinada del algoritmo Wagner-Whitin para la definición de la política de reposición de inventarios en un sistema de operación basado en proyectos, integrando los niveles de capacidad y los costos del proveedor por tipo de material para reducir los costos logísticos de abastecimiento y garantizar la disponibilidad de materiales en cada etapa del proyecto. Se utilizan como datos de entrada la programación de las actividades de un proyecto de ingeniería, con los requerimientos de materiales. Se aplica el algoritmo combinado de lo cual se obtiene el nivel óptimo de costos del sistema, y la programación del abastecimiento por fuente de suministro para cada periodo requerido.*

*Palabras Clave– Abastecimiento, Inventarios, Proyectos, Cadena de suministro, Logística.*

## I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de las empresas basadas en proyectos, la programación del abastecimiento de materiales y servicios debe considerar las características de cada proyecto, las especificaciones técnicas y de diseño, las condiciones de temporalidad y la definición de las etapas para su ejecución [1].

La definición de políticas de suministro considera entre otros aspectos los requerimientos en términos de demanda por periodo de tiempo [2], en este sentido la técnica de programación a utilizar en el proceso de abastecimiento se selecciona de acuerdo al patrón de demanda presente.

Un determinante en la política de gestión de inventarios en las organizaciones basadas en proyectos es el tipo de materiales a utilizar por proyecto [3]. La política seleccionada es diferente para los materiales que se requieren continuamente y en volúmenes predecibles, independiente del proyecto a fabricar, que para los materiales especiales o de diseño exclusivos para las especificaciones particulares del proyecto.

Una situación particular en proyectos, tiene que ver con las limitaciones de tiempo para la estimación de los recursos necesarios del proyecto [4].

Una causa común de los problemas de calidad y cantidad en la recepción de pedidos se relaciona con el traslape de las etapas de diseño con las etapas de producción en el desarrollo de los proyectos. En este sentido se deben implementar estrategias de planificación y programación para la toma de decisiones en el suministro de forma oportuna y racional.

Se utiliza como técnica los métodos de lote dinámico con el algoritmo Wagner-Whitin para programar el abastecimiento por tipo de materiales en los periodos de tiempo del proyecto, considerando los requerimientos de recursos por proyecto, las capacidades disponibles de los proveedores de la red de suministro y los costos asociados.

## II. DETERMINACIÓN DE DEMANDA IRREGULAR EN EL ABASTECIMIENTO DE MATERIALES

La determinación del comportamiento irregular para el abastecimiento, es un proceso en el cual se establece un patrón de demanda que aunque es conocido no conserva un valor constante en el tiempo, caso típico de los proyectos en los cuales se conoce con antelación la demanda de materiales para realizar cada una de las actividades, pero estas se concentran al inicio de cada actividad.

Por tanto, el uso de técnicas estadísticas se hace imprescindible para comprobar las características propias de este tipo demanda irregular y determinística. Para lograr este objetivo de verificación del supuesto referido, se utiliza la prueba de Peterson – Silver, la cual considera una medición de la variabilidad de la demanda, a través de un análisis y comparación de la suma de cuadrados en la colección de datos de la demanda. De esta manera, la prueba estadística de Peterson – Silver describe la forma de estimación de este coeficiente de variabilidad tal como se presenta en (1). Obteniendo dos contrastes de decisión frente a su resultado [5] [6].

$$V = \frac{n \sum_{t=1}^n D_t^2}{[\sum_{t=1}^n D_t]^2} - 1. \quad (1)$$

Donde,

Dt: Es la demanda pronosticada para un periodo de tiempo t,  
n: El horizonte de planeación o tamaño de la colección de datos.

Una vez estimado el valor del coeficiente de variabilidad es posible determinar dos posibles cursos de acción, definidos en (2) y (3).

$$\text{Si } V < 0.25. \quad (2)$$

$$\text{Si } V \geq 0.25. \quad (3)$$

En el primer curso de acción, la demanda es determinística y se sugiere el uso de EOQ (*Economic Order Quantity*).

En el segundo curso de acción, la demanda es irregular y se sugiere el uso de un modelo de tamaño de lote dinámico.

### III. ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE LOTE DINÁMICO POR MEDIO DEL ALGORITMO WAGNER – WHITIN

Una vez se ha determinado un patrón de comportamiento irregular y determinístico en las demandas de materiales, es necesario la fijación de un tamaño de lote dinámico, para este propósito una de las opciones disponibles es el método de Wagner– Whitin, el cual es utilizado en la obtención de soluciones óptimas con una política de mínimo costo de gestión en el aprovisionamiento [7].

Este método busca la minimización de los costos fijos de pedido con un solo proveedor y los costos variables de mantener inventario. Se emplea la notación descrita por autores como Sipper & Bulfin, para el cálculo de todas las posibles alternativas de gestión de materiales entre un periodo de pedido y periodos de consumo [6, 7].

$$K_{tl} = A + h \left[ \sum_{j=t+1}^l (j - t) D_j \right]. \quad (4)$$

$$t = 1, 2, 3 \dots T; l = t + 1, t + 2, \dots, T$$

Donde:

K<sub>tl</sub>: Costo total de inventario pedido en el periodo t para consumo en el periodo l.

A: Costo de pedido para el proveedor definido del proyecto.

h: Costo de mantener una unidad en inventario del proyecto.

D<sub>j</sub>: Demanda pronosticada para un periodo de tiempo j.

t: Periodo de pedido de material al proveedor.

l: Periodo de consumo del material en el proyecto.

Con la ecuación anterior es posible el cálculo del costo total de la gestión de inventarios para todas las posibles combinaciones entre los periodos de pedidos y consumo. Cuando se inicia el cálculo en un nuevo periodo de pedido para todas las opciones de consumo es necesario realizar la modificación de cálculo del costo a partir de (5).

$$K_l^* = \min_{t=1,2,\dots,l} \{K_{t-1}^* + K_{tl}\} \quad l = 1, 2, \dots, T. \quad (5)$$

Donde: K<sub>T</sub><sup>\*</sup> es el valor de la solución de mínimo costo.

### IV. PARÁMETROS DE ENTRADA DEL PROYECTO

El proyecto en análisis está integrado por catorce actividades a las cuales se les asignó un código, condiciones de precedencia, tiempos estimados de duración con carácter determinístico, tres tipos de materiales críticos en la gestión y el costo estimado por uso de recursos necesarios diferentes al requerimiento de materiales durante el desarrollo del proyecto, información detallada en la tabla 1 del documento.

Es necesario anotar que las unidades naturales de medida para el proyecto en estudio son, en tiempo los días de duración, en costo miles de pesos colombianos, y en la gestión de pedidos de los materiales unidades de presentación para compra.

TABLA 1  
DATOS DE PRECEDENCIA, COSTO, DURACIÓN Y MATERIAL ASOCIADOS AL PROYECTO EN ANÁLISIS

Actividad	Dependencia	Tiempo normal (Días)	Tiempo límite (Días)	Costo normal (Miles de \$)	Costo límite (Miles de \$)	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				1,700	2,610			

Como resultado de la fase anterior, la red de actividad es sometida a un proceso de optimización a través de la técnica de minimización paramétrica [8], con la cual fue posible la obtención de las fechas de iniciación y finalización más tempranas y tardías, y la definición del tipo de actividad, según se presenta en la tabla 2. Estos resultados corresponden a la fase de planeación de proyectos de la investigación.

TABLA 2  
ACTIVIDADES CRÍTICAS DEL PROYECTO

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

#### V. DETERMINACIÓN DEL PATRÓN DE DEMANDA EN LOS MATERIALES DEL PROYECTO

En este ámbito, la demanda de materiales en el proyecto tal como se proyectaba antes del estudio a partir de un análisis intuitivo, posee un comportamiento irregular, el cual fue comprobado mediante un análisis de datos a través de la técnica de Peterson – Silver.

Para este efecto se analiza el comportamiento del abastecimiento de materiales del proyecto el cual se realiza acorde a la siguiente regla simple de decisión: antes del inicio de cada actividad se realiza una orden de pedido, la cual arriba al proyecto en la fecha de inicio respectiva, esto con el fin de garantizar las existencias necesarias para iniciar cada una de las actividades.

Lo anterior hace que los periodos de arribo bajo una orden de arribo en el modelo coincidan generando un dato de demanda, el cual ingresará a la colección de datos con parámetros de cantidad requerida y tiempo en el cual es requerido.

Una vez se colectó esta información se procedió a realizar el análisis estadístico de cada una de las series de datos correspondientes de cada una de las demandas de los materiales, encontrando los resultados que se presentan en la tabla 3.

La duración total del proyecto en estudio corresponde a 45 días estimados, periodo en el que se realiza un mayor control a las actividades con código A, D, H, L y N, que corresponden a actividades de ruta crítica, las cuales ante cualquier retraso ocasionaran la ampliación de la terminación del proyecto, factor indeseable en el desarrollo del proyecto.

TABLA 3  
ESTIMADORES DE VARIABILIDAD DE LA DEMANDA EN LOS TRES TIPOS DE MATERIALES DEL PROYECTO

Material	Estimación del parámetro	Conclusión
M1	$V = 12.253$	Las demandas son irregulares, es factible usar un modelo de lote dinámico en los tres tipos de material.
M2	$V = 11.280$	
M3	$V = 9.1953$	

Los resultados anteriores permiten concluir de manera inequívoca que las demandas de los tipos de materiales requeridos en el proyecto tienen un comportamiento irregular y determinístico, en el cual es posible aplicar un modelo de abastecimiento con lote dinámico.

#### VI. RESULTADOS POLÍTICA DE INVENTARIOS UTILIZANDO WAGNER-WHITIN

Para la construcción de la política, se utiliza como insumo los pedidos provenientes de la red reseñada y de la estimación del coeficiente de variabilidad de la demanda, con los cuales es posible la implementación de una política óptima con el método de Wagner-Whitin.

Con base en la información proporcionada en cuanto a costos de mantenimiento, pedido y capacidad de los diferentes proveedores, se establecen las siguientes reglas simples de asignación: asignación en cada periodo de la mayor cantidad de material al proveedor con menos costo disponible y, oferta

disponible del material. El proceso continua hasta completar el requerimiento.

Una vez considerada esta asignación, las reglas simples muestran la flexibilización del modelo de Wagner–Whitin para la situación de proyectos, en las cuales en caso de poseer un requerimiento mayor a la oferta conjunta de los proveedores se realiza un pedido en los periodos anteriores al proveedor con menor costo, incurriendo en el costo de mantenimiento de inventario hasta completar el requerimiento para el día de inicio de las actividades.

En otro caso, en el cual el requerimiento de material supere la capacidad conjunta de los proveedores pero no exista la posibilidad de realizar pedidos en periodos anteriores a un proveedor, se realiza el abastecimiento en los periodos posteriores, seleccionando al proveedor con costo de pedido y envío más bajo, realizando un ajuste en el consumo de materiales, asignando el disponible de estos a las actividades críticas y los pedidos diferidos a las actividades no críticas,

aprovechando para ello los tiempos de holgura de este tipo de actividades, situación que no afecta la duración total del proyecto.

Los resultados de la programación de suministro se observan en la tabla 4, en la cual se describe las cantidades de material en unidades de medida que deben ser pedidos en cada uno de los periodos del horizonte de planeación del proyecto a cada proveedor de tres disponibles para el suministro de materiales.

Estos proveedores presentan como característica una capacidad limitada de oferta de los materiales, por lo cual no es posible cumplir el requerimiento inicial de material tipo 2 existiendo un faltante igual a 20 unidades, las cuales se reponen en el periodo siguiente por parte del proveedor 1, generando una situación de abastecimiento con demanda diferida que no genera inconvenientes en el desarrollo de las actividades planeadas.

TABLA 4.  
CANTIDAD DE MATERIAL PROGRAMADA DE SUMINISTRO POR DÍA CRÍTICO  
(UNIDADES)

Material	Proveedor	Día															
		0	1	7	8	9	10	19	20	22	23	27	28	33	36	37	
M1	P1			50	50	50	50				20	50			50	20	50
M1	P2			30	30	30	30					30					30
M1	P3	100															
M2	P1	30	20	30	30	30	30	30	30		30					20	30
M2	P2	20			20	20	20		20		20						20
M2	P3	30		10	30	30	30	10	30								30
M3	P1	100			100												
M3	P2							80				80	70	80			
M3	P3				50			20				20					

Se presentan pedidos en la solicitud de materiales entre los días 7 a 10, 20 a 23 y 36 a 37. El proveedor 1 es el líder de los proveedores con 21 pedidos (45%) equivalentes a 900 unidades (47% del total), donde el objetivo del modelo fue minimizar los costos de producción.

Los costos de las ordenes programadas para cada material en cada proveedor se enuncian en las tablas 5, 6 y 7, donde se evidencia un aumento de los costos de pedido y envío en cuanto a los materiales tipo 2 y 3, los cuales tienen un mayor número de pedidos atribuibles a la escasa capacidad de los proveedores.

TABLA 5  
COSTO DE ORDENAR EL MATERIAL TIPO 1

Proveedor	Día									
	0	7	8	9	10	22	23	33	36	37
P1		45	45	45	45	45	45	45	45	45
P2		45	45	45	45		45			45
P3	45									

TABLA 6  
COSTO DE ORDENAR EL MATERIAL TIPO 2

Proveedor	Día										
	0	1	7	8	9	10	19	20	23	36	37
P1	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
P2	105			105	105	105			105	105	105
P3	105		105	105	105	105	105	105			105

TABLA 7  
COSTO DE ORDENAR EL MATERIAL TIPO 3

Proveedor	Día					
	0	8	10	23	27	28
P1	95	95				
P2			95	95	95	95
P3		95	95	95		95

En la tabla 8 se presenta el resumen de las cantidades a almacenar de cada material resultado del proceso de planeación en la gestión de inventarios, de igual manera la tabla 9 presenta los costos de almacenamiento e inventario que se generan en el sistema.

TABLA 8  
CANTIDAD ESPERADA DE MATERIALES ALMACENADOS POR PERIODO DE TIEMPO

Tipo Material	Días						
	7	8	9	19	22	27	36
M1	80	160	240		20		20
M2	40	110	160	40			20
M3							70

TABLA 9  
COSTOS DE ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE INVENTARIOS

Tipo de Material	Día						
	7	8	9	19	22	27	36
M1	781.8	1,564	2,345		196		196
M2	279	558	837	220.2			110
M3						448	
Costo día	1,061	2,122	3,182	220.2	196	448	306
Costo total Inventarios							\$ 7,535

## VII. CONCLUSIONES

El material tipo 1 evidencia ser el 35% del total del material solicitado con 670 unidades, al igual que tan solo el 21% de los costos de envío con 950,000 pesos, mientras para el material tipo 2 se realizan pedidos por 650 unidades con costos de pedido y envío equivalentes al 62% del total con 2,730,000 de pesos en esta actividad.

En general, al realizar un análisis con el mismo modelo de Wagner – Whitin sin considerar la capacidad de oferta de los proveedores, presenta una mejor opción en relación a costos, ya que privilegia el almacenamiento sobre la realización de pedidos, generando inferiores costos de gestión de inventario y materiales.

Al ser comparado con el modelo presentado desprecia el supuesto de capacidad de los proveedores fundamento del presente artículo de investigación, donde se muestra una acumulación durante los periodos 7 al 9 en los materiales 2 y 3 para ser liberados al final de estos en las actividades programadas con inicio en estos periodos, caso que también se presentan en los días 19, 22, 27 y 36 con todos los materiales.

Por tanto, la aplicación del modelo de Wagner – Whitin relajado para la situación de proyectos presenta menores

niveles de inventario de los materiales, generando un mejor desempeño de los costos, donde se presenta un consolidado de los costos de pedido y envío más los costos de mantener inventario en los periodos donde estos existen.

De esta manera, los flujos de dinero se presentan de forma direccionada por cada tipo de material por periodo de tiempo, proporcionando una mejor planeación de este recurso destinado al pago de proveedores, distribuyendo las cuantías en costos de envío con una suma de \$ 4,400,000 de pesos colombianos distribuidos en 49 envíos y un costo de mantener inventario que asciende al 63% de los costos totales de la gestión de inventarios tasados en \$7,535,000 de pesos colombianos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Aloini, R. Dulmin, V. Mininno y S. Ponticelli, «Key antecedents and practices for supply chain management adoption in projects context.» *Journal Project Management*, vol. 33, n° 6, pp. 1301-1316, 2015.
- [2] R. Ballou, *Logística, Administración de la cadena de suministro*, Ciudad de Mexico, Mexico: Pearson, 2004.
- [3] X. Xue, Q. Shen, Y. Tan, Y. Zhang y H. Fan, «Comparing the value of information sharing under different inventory policies in construction supply.» *Journal Project Management*, vol. 29, n° 7, pp. 867-876, 2010.
- [4] T. Ala-Risku, J. Collin, J. Holmström y J. Vuorinen, «Site inventory tracking in the project supply chain: problem description and solution proposal in a very large telecom project.» *Supply Chain Management International Journal*, pp. 252-260, 2010.
- [5] R. Peterson y E. Silver, *Decision Systems for Inventory Management and Production Planning*, New York, EEUU: Wiley and Sons, 1979.
- [6] D. Sipper y R. Bulfin, *Planeacion y control de la produccion*, Ciudad de Mexico: Mc GRaw Hill, 1998.
- [7] H. Warner y T. Whitin, «Dynamic version of the Economic Lot Size Model.» *Management Science*, vol. 5, n° 1, pp. 89-96, 1958.
- [8] D. Kalenatic, *Técnicas de Planeacion de Redes*, Bogotá D.C.; Colombia: Fondo de Publicaciones Universidad Distrital, 1993.