

# MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN INTEGRANDO CRITERIOS FINANCIEROS

A. Arroyo Marín<sup>1</sup> & J. Lince Montes<sup>2</sup>

*Facultad de ingeniería industrial, Pontificia Universidad Javeriana Cali*

## Resumen

La investigación que se presenta a continuación hace referencia al desarrollo de un modelo matemático multi objetivo con características determinísticas para el diseño de una red de distribución. Este modelo es adaptado a una empresa colombiana de productos de consumo masivo que abastece otros países, con un periodo de evaluación de cinco años y una variabilidad en la demanda generada a partir de datos históricos en tres escenarios. Se parte de una estructura de red establecida compuesta por plantas, centros de distribución y clientes, asumiendo que dos centros de distribución están abiertos y cuya problemática central radica en maximizar el valor presente neto y minimizar el riesgo a la baja de la inversión que se genera al expandir la red, teniendo en cuenta dos potenciales ubicaciones de expansión. La estrategia de solución desarrollada para tratar los efectos del modelo multi objetivo, es la metodología Epsilon constraint ( $\epsilon$ -constraint).

**Palabras clave:** red de distribución, modelo matemático, escenarios, optimización, valor presente neto, riesgo a la baja, épsilon constraint.

## Introducción

En la actualidad, el diseño de redes de distribución para realizar tareas de transporte-almacenamiento es un asunto complejo en el

cual se deben tomar decisiones de carácter estratégico y táctico en condiciones cambiantes y difíciles de revertir que involucran la estabilidad financiera de la organización a largo plazo. Al momento de abordar problemáticas sobre expansión o contracción de la red de distribución con base a la demanda, los modelos basados en costes de diseño no proporcionan la solución óptima tomando distintos periodos de valoración que indique al responsable logístico qué instalación abrir, en dónde, qué demanda suplir y con cuál capacidad de distribución sin poner en riesgo la estabilidad económica de la empresa, por ende es necesario incluir en la función objetivo del modelo matemático de este problema el máximo de los beneficios o la recuperación de las inversiones.

## Fundamentación teórica

La cadena de suministro consiste en una serie de eslabones ubicados en forma de red, que una compañía dispone para realizar todas las funciones implicadas en la recepción y satisfacción del pedido de un cliente. Melo et al. (2009) aseguran que la configuración de la red solamente se veía como un problema de localización discreta donde se debía seleccionar el mejor lugar para ubicar una instalación minimizando la distancia recorrida para ahorrar costos de transporte. Al

---

<sup>1</sup> Cel: 3159268738 E-mail adress: Andres.arroyo.marin@hotmail.com

<sup>2</sup> Cel: 3186437517 E-mail adress: judali27@gmail.com

ajustar los problemas a condiciones reales se empezaron a relacionar variables como la asignación de inventarios, el tamaño de instalaciones a construir y la demanda de los diferentes tipos de clientes a atender.

Existen diferentes técnicas para medir la rentabilidad de un proyecto de ingeniería, ya sea de manera monetaria, porcentaje o en duración de tiempo. Dadas las consideraciones de una posible inversión monetaria a ejecutar se estudian los siguientes criterios financieros:

### **Valor Presente Neto**

El Valor Presente Neto responde a la pregunta sobre qué cantidad de efectivo necesitará tener un inversionista el día de hoy como sustituto de la inversión. Vale la pena hacer una inversión si se obtiene un Valor Presente Neto positivo. Si el valor presente neto de una inversión es negativo, debe ser rechazada. Ross, A., Westerfield, R., Jordan, B. (2000).

### **Riesgo financiero**

En contexto con el enfoque del modelo, se define el riesgo financiero como la probabilidad de que el Valor Presente Neto resultante de la inversión en la apertura y/o cierre de un o más centros de distribución no alcancé la utilidad  $\Omega$  esperada. (Barbaro & Bagajewicz, 2002). El riesgo asociado a un diseño  $x$  y un determinado beneficio  $\Omega$  está expresado por la siguiente probabilidad discreta:

$$Risk(x, \Omega) = P(Beneficio(x) < \Omega) \quad (1)$$

Sea:  $Beneficio(x)$ : el actual beneficio.

### **Rediseño de la red de distribución**

La formulación del modelo matemático es la siguiente:

### **Metodología Epsilon constraint ( $\epsilon$ -constraint)**

Con base a lo expuesto por Hwang y Massud (1979)  $\epsilon$ -constraint es uno de los métodos de solución a posteriori de problemas de Programación Matemática Multi-objetivo, es decir un método en que el tomador de decisiones integra sus preferencias al proceso de toma de decisión luego de ejecutar la fase de cálculo, teniendo así la oportunidad de observar todas o al menos una representación suficiente de las soluciones a través de diagramas de Pareto, pudiendo contrastar así las soluciones y elegir entre ellas la que lo satisfaga.

### **Técnica de generación de escenarios**

De manera general Sodhi et al. (2009) plantea que existen dos métodos cuantitativos para la generación de estos: Las técnicas paramétricas de generación de escenarios se basan en parámetros estadísticos para elaborar escenarios que son totalmente hipotéticos. Entre los más destacados se encuentran: 1) Simulación Montecarlo la cual genera escenarios de acuerdo a una distribución estadística y 2) Generación de árboles de escenarios caracterizados como procesos estocásticos. Por otro lado, las técnicas no paramétricas se caracterizan por tener escenarios representados por datos reales que tiene el tomador de decisión. Una de las técnicas más conocidas es la generación por datos históricos, donde se consideran los datos del pasado como potenciales escenarios.

Maximizar VPN

$$\text{Maximizar VPN} = \sum_{s=1}^S \varphi_s \left[ \sum_t \frac{FCL_t}{(1 + WACC)^t} \right] - Inv_0 \quad (2)$$

Donde:

$$FCL_t = [Ingresos_t - Costos_t] * (1 - TIMPR) + Depam_t \quad \forall t \quad (3)$$

$$Inv_0 = \sum_{j=1}^J IIACD_j \cdot L_j \quad (4)$$

De esta manera es posible detallar el cálculo de cada uno de los factores que componen  $FCL_t$ :

$$Ingresos_t = \sum_j^{CD} \sum_k^C \sum_p^{PT} (PVPTN_{pkt} \cdot Y_{jkpst}) \quad \forall t \quad (5)$$

$$Costos_t = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CTRPTPLCD_{ijt} \cdot X_{ijpst}) \quad (6)$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P (CTRPTCDCD_{jj^*t} \cdot V_{jj^*pst}) \quad (7)$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (CTRPTCDC_{jkt} \cdot Y_{jkpst}) \quad (8)$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CVFPT_{ipt} \cdot X_{ijpst}) \quad (9)$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CMIPTCD_{jpt} \cdot I_{pjst}) \quad (10)$$

$$+ \sum_{i=1}^I (CFOPL_{it} + GAMDPPL_{it}) \quad (11)$$

$$+ \sum_{j=1}^J (CFOCD_{jt} + GAMDPCD_{jt}) \cdot L_j \quad (12)$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P (CPFUE_{ipt} \cdot Kad_{its}) \quad \forall t \quad (13)$$

$$Depam_t = \sum_{i=1}^I GAMDPPL_{it} + \sum_{j=1}^J GAMDPCD_{jt} \cdot L_j \quad \forall t \quad (14)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{ijpst} \leq KPLPT_i + Kad_{its} \quad \forall i \in PL, t \in T, s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{ijpst} + \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P V_{j^*jpst} \leq KFC DPT_j * L_j \quad \forall j \in CD, s \in S, t \in T \quad (16)$$

$$I_{pjst} + \sum_{k=1}^K Y_{jkpst} + \sum_{j^*=1}^J V_{j^*jpst} - I_{pjs(t-1)} = \sum_{i=1}^I X_{ijpst} + \sum_{j^*=1}^J V_{j^*jpst} \quad \forall j \in CD, s \in S \in T, p \in P \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{jkpst} \leq DEMCPT_{kpts} \quad \forall k \in C, p \in PT, s \in S, t \in T \quad (18)$$

$$X_{ijpst}, Y_{jkpst}, V_{j^*jpst}, I_{pjst}, Kad_{its} \geq 0 \quad \forall i, j, j^*, k, p, s, t; w_j \in [0,1] \quad \forall j \quad (19)$$

## Resultados y conclusiones

Con base en la metodología  $\varepsilon$ -constraint, en primer lugar, se valida el modelo de maximización del Valor Presente Neto, para la verificación de sus restricciones frente a las variables resultantes y la obtención de un valor de ganancia deseada. En segundo lugar, se cambia la función objetivo para validar el modelo de minimización del riesgo financiero a la baja. Finalmente se valida el modelo maximización del Valor Presente Neto incluyendo el riesgo financiero a la baja como una restricción. Para cada modelo se utilizó una tasa de retorno del 25%, es decir  $WACC = 25\%$ .

## Experiencia computacional

Cada modelo fue resuelto a través del servidor NEOS, el cual contiene el solver CPLEX utilizado para resolver problemas de programación lineal entera en lenguaje AMPL.

Los modelos consideraron una planta en operación ubicada en la ciudad de Cali, dos

*Resumen resultados maximización del Valor Presente Neto:*

Centros de distribución en operación y un Centro de distribución potencial para realizar una inversión de expansión de la red, sesenta clientes a nivel nacional y doscientos cincuenta productos fabricados por la empresa.

## Resultados Modelo optimizando VPN

Para el modelo de maximización del VPN se decide continuar trabajando con los centros de distribución de Cali y Bogotá y además se decide dar apertura al centro de distribución de Medellín, dando como resultado un valor presente neto de \$ 85.940.867.150 y unos costos totales logísticos de \$ 21.135.836.678, se puede observar que el VPN equivale aproximadamente a cuatro veces los costos totales logísticos, con esta observación podemos concluir que la operación es rentable. Cabe resaltar que los resultados para el VPN y los costos totales logísticos son el promedio de los resultados de estos para cada uno de los tres escenarios.

Tabla 1

VPN	\$ 85.940.867.150
Costos	\$ 21.135.836.678
CD a invertir	1
Ubicación	Medellín
CD a cerrar	0
Total CD	3
Ubicación	Cali, Bogotá y Medellín

**Fuente:** los autores.

En la tabla 1 se observa la configuración de red de distribución que brinda el modelo, como principal novedad se resalta el hecho de que sugiere la apertura del centro de distribución en Medellín, opción que se tenía a consideración, y además decide no cerrar ambos de los centros de distribución que operan actualmente en Cali y Bogotá.

### Resultados Modelo Minimizando Riesgo Financiero

Para el modelo de minimización del riesgo financiero a la baja se realizaron diez Tabla 2

corridas, en cada una de estas corridas se cambió el valor del parámetro omega ( $\Omega$ ) que es el parámetro base para el cálculo del riesgo a la baja. En la primera corrida se definió el valor de omega como el valor que resultó del modelo de maximización del VPN, en esta se obtuvo el valor del riesgo a la baja y el VPN que se obtendría el modelo, para la segunda corrida del modelo se tomó omega como el valor del VPN resultante de la primera corrida, y así mismo se realizó para las siguientes corridas, tomando omega como el VPN resultante de la corrida anterior hasta completar las 10 corridas.

*Resumen de resultados bajo la metodología  $\epsilon$ -constraint.*

Corrida	Omega	Riesgo a la baja	VPN	Porcentaje de utilidad alcanzada	Porcentaje de utilidad sin alcanzar
1	\$ 85.940.867.150	\$ 18.011.868.813,40	\$ 67.843.057.469,50	78,94%	20,96%
2	\$ 67.843.057.469,50	\$ 11.985.298.189,60	\$ 55.789.916.221,90	82,23%	17,67%
3	\$ 55.789.916.221,90	\$ 7.971.602.154,00	\$ 47.762.524.150,80	85,61%	14,29%
4	\$ 47.762.524.150,80	\$ 5.298.480.594,40	\$ 42.416.281.031,50	88,81%	11,09%
5	\$ 42.416.281.031,50	\$ 3.518.181.635,00	\$ 38.855.683.114,20	91,61%	8,29%
6	\$ 38.855.683.114,20	\$ 2.332.502.529,40	\$ 36.484.324.901,50	93,90%	6,00%
7	\$ 36.484.324.901,50	\$ 1.542.840.244,00	\$ 34.905.000.331,00	95,67%	4,42%
8	\$ 34.905.000.331,00	\$ 1.016.925.162,00	\$ 33.853.170.168,00	96,99%	3,00%
9	\$ 33.853.170.168,00	\$ 666.665.718,00	\$ 33.152.651.279,00	97,93%	2,01%
10	\$ 33.152.651.279,00	\$ 433.392.928,00	\$ 32.686.105.699,00	98,59%	1,33%

Fuente: el autor.

En la tabla 2 se observa cómo se llevó a cabo la dinámica para definir el omega en cada corrida, además del resumen de resultados para cada una de estas. A partir de estos resultados se abre un espacio para realizar varias observaciones. En primer lugar es notorio como a medida que disminuye el VPN que se desea alcanzar también disminuye el porcentaje de utilidad que no se alcanzará o riesgo a la baja y como tiende este a cero, en la figura 2 se puede observar claramente esta tendencia. Lo anterior indica que entre menor sea el VPN (omega) que se desea alcanzar, va a ser más grande el

porcentaje de este que se alcanzará, llegando casi al 100%. En segundo lugar es pertinente mencionar que aunque se define el omega en la primera corrida como el VPN resultante del modelo de maximización del VPN, se obtiene como resultado que no se alcanzará el 100% de este si no un 78,94%. En tercer lugar se verifica que el modelo cumple su cometido de presentar al tomador de decisiones una muestra representativa de soluciones y queda en manos de él elegir el objetivo al que apuntará y el riesgo a la baja al cual se someterá.

## BIBLIOGRAFIA

- Ambrosino, D. & Scutella, M. G. (2001). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operation Research*, 165, 610-624.
- Amir, A. & Javi, N. A. (2009) Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E*, 46, 582-597.
- Azaron, A., Brown, K.N., Tarim S.A., & Modarrese, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116, 129-138.
- Ballou, R. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Mexico D.F.: 5 ed. Pearson Education.
- Berman, O. & Krass, D. (2002). Recent Developments in the Theory and Applications of Location Models. *A Preview. Annals of Operations Research*, 111, 15- 16.
- Bagajweicz, M. J. & Barbaro, F. A. (2003). Financial risk management in planning under uncertainty. *Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations*.
- Camm, J. D., Chorman, T., Dill, F., Evans, J., Sweeney, D. & Wegryn, G. (1997). Source – Blending ORIMS, Judgment, and GIS: Restructuring P&G's Supply Chain. *Interfaces*, 1, 128 – 142.
- Chen, G., Daskin, M. & Shen, Zuo-Jun. (2005). A model For Stochastic Facility Location Modeling. *Research Report*, University of Florida.
- Council of Supply Chain Management Professionals. (2016). Glosary of Recuperado de [https://cscmp.org/imis0/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossery\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](https://cscmp.org/imis0/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossery_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921)
- Chopra, S. (2001). Designing the distribution network in a supply chain. *Evanston. Northwestern University: Kellogg School of Management*.
- Chopra, S y Meindl, P. (2007) *Supply chain management: Strategy, planning and operation*. New Jersey: 3 ed. Prentice Hall, Inc.
- Daskin, M.S. (1995). Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications. *New York: Wiley-Interscience*.
- Daskin, M., Hesse, S.M., y Reville, C.S. (1998),  $\alpha$ -Reliable P – Minimax Regret: A new model for strategic facility location modeling. *Location Science* 5, 227 – 246.
- Drezner, Z. & Hamacher, H.W. (2004). Facility Location: Applications and Theory. Berlin: *Springer*.
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria optimization 2 ed*. Recuperado de <http://www.math.hcmus.edu.vn/~nvthuy/om/Multicriteria%20Optimization.pdf>
- Escobar, John Wilmer. (2008). *Modelo de Diseño de Redes de Distribución de Productos de Consumo Masivo con Elementos Estocásticos*. (Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Industrial). Universidad del Valle. Cali.
- Escobar, J. W. (2012). Rediseño de una red de distribución con variabilidad de demanda usando la metodología de escenarios. Bogotá: *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, 9-19.
- Escobar, J.W. (2016). Optimización de redes de distribución con criterios financieros. *En trámite de publicación*.

- Felizzola, Jaime Andrés Y Toledo, Natalia. (2010). *Modelo de optimización para el diseño de redes de distribución de productos de consumo masivo con variabilidad de demanda*. (Trabajo de grado Ingeniero Industrial). Pontificia Universidad Javeriana Cali. Facultad de ingeniera. Ingeniera Industrial. Cali.
- Fisher, M.L., Hammond, J.H., Obermeyer, W.R. & Raman, A. (1994). Making Supply Meet Demand in an Uncertain World. *Harvard Business Review*, 83–93.
- Friedman, T.L. (2007). *The World is Flat: A Brief History of the Twenty-First Century*, Picador/Farra, Stratus and Giroux: New York.
- Guillén, G., Mele, F., Bagajewicz, M., Espuña, A. & Puigjaner, L.(2005). Multiobjective supply chain design under uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 60(1), 1535-1553.
- Klibi, W. & Martel, A. (2012). Scenario-bases Supply Chain Network risk modeling. *European Journal of Operational Research*, 223, 644-658.
- Laval, C., Feyh, M., Y Kakouros, S. (2005). Hewlett-Packard Combined OR and Expert Knowledge to Design Its Supply Chains. *Interfaces*, 35(3), 238 – 247.
- Lee, H., & Billington, C. (1993). Material management in decentralized supply chains. *Operations Research*, 41(5), 835–847.
- Lee H., & Feitzinger, E. (1995). Product configuration and postponement for supply chain efficiency. *4th Industrial Engineering Research Conference*, 43-48.
- Lee, H., Padmanabhan, V. y Whang, S. (1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review* 38 (3), 93–102.
- Lin, C.K.Y. (2009). Stochastic single-source capacitated facility location model with service level requirements. *International Journal of Production Economics* 117(2), 439–451.
- Melo, M.T., Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196, 401–412
- Ministerio de comercio, industria y turismo. (2016). *Acuerdos Comerciales De Inversión. Acuerdos vigentes*. Recuperado de <http://www.tlc.gov.co/publicaciones.php?id=5398>
- Mirhassani, S., Lucas, C., Mitra, G., Messina, E., Poojari, C. (2000). Computational Solutions of Capacity Planning Models under Uncertainty. *Parallel Comput*, 26, 511-538.
- Sabriá, F. (2004). *La cadena de suministro. Modelos y herramientas de planificación y optimización de la cadena de suministro*. Barcelona: 1 ed. ICG Marge; Logis Book.
- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167, 96–115.
- Scaparra, M. & Scutella, M. (2001). Facilities, Locations, Customers: Building Blocks of Location Models. *A Survey. Pisa: Technical Report: TR – 01 – 18*.
- Schilling, D. (1982). Strategic Facility Planning: The Analysis of Options. *Decisions Sciences*, 13, 1-14.
- Simchi-Levi, D., Bramel, J., Chen, X. (2005). *The Logic of Logistic*. New York: Springer.
- Snyder, L. (2006). Facility Location Under Uncertainty: A Review. *Bethlehem. IIE Transactions*, 38(7), 537-554.

Sodhi, M. & Tang, C. (2009). Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: A survey motivated by asset–liability management. *International Journal of Production Economics*, 121, 728-738.

Swaminathan, J.M. & Tayur, S.R. (2003). Models for Supply Chains in E-Business. *Management Science*, 49(10).

Tsiakis, P., Shan, N., & Pantelides, C.C. (2001). Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty. *Industry & Engineering Chemistry Research*, 40, 3585 – 3604.

Vanston, J., Frisbie, W., Lopreato, S., & Proston, D. (1977). Alternate scenario planning, 10, 159-180.

ANEXO 1: Conjuntos y variables

## Notación del modelo

### *Conjuntos principales:*

PL = Conjunto de Plantas de Manufactura, indexadas por  $i$ .

CD = Conjunto de Centros de Distribución, indexados por  $j$ .

C = Conjunto de Zonas Geográficas de Mercado o Clientes, indexadas por  $k$ .

PT = Conjuntos de Productos Terminados, indexados por  $p$ .

T = Conjunto de periodos de valoración, indexados por  $t$ .

S = Conjunto de escenarios, indexados por  $s$ .

### *Conjuntos inducidos*

CD\_RE( $j$ ) = Conjunto de centros de distribución que pueden recibir productos enviados desde el centro de distribución  $j \in CD$ ;  $CD\_RE(j) \subseteq CD$ .

CD\_EN( $j$ ) = Conjunto de centros de distribución que pueden enviar productos al centro de distribución  $j \in CD$ ;  $CD\_EN(j) \subseteq CD$ .

CDA( $j$ ) = Conjunto de Centros de Distribución  $j \in CD$  que están abiertos y pueden ser cerrados;  $CDA(j) \subseteq CD$ .

CDL( $j$ ) = Conjunto de Centros de Distribución  $j \in CD$  que pueden ser abiertos;  $CDL(j) \subseteq CD$ .

### *Parámetros*

$CTRPTPLCD_{pijt}$  = Costo de transporte de producto terminado  $p \in PT$  desde la planta  $i \in PL$  hacia el centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  [\$/Unidades de  $p$ ].



$CTRPTCD_{pjj^*t}$  = Costo de transporte de producto terminado  $p \in PT$  desde centro de distribución  $j \in CD$  hacia centro de distribución  $j^* \in CD$  en el periodo  $t \in T$  [\$/Unidades de p],  $j \neq j^*$ .

$CTRPTCD_{pjk t}$  = Costo de transporte de producto terminado  $p \in PT$  desde el centro de distribución  $j \in CD$  hacia el cliente  $k \in C$  en el periodo  $t \in T$  [\$/Unidades de p].

$CVFPT_{ipt}$  = Costo variable de fabricación del producto terminado  $p \in PT$  en la planta  $i \in PL$  en el periodo  $t \in T$  [\$/Unidades de p].

$CMIPTCD_{jpt}$  = Costo de mantenimiento del inventario de producto terminado  $p \in PT$  en el centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  [\$/Unidades de p].

$CFOPL_{it}$  = Costo fijo de operación de la planta  $i \in PL$  en el periodo  $t \in T$  [\$/periodo].

$GAMPPL_{it}$  = Gastos de amortización y depreciación de la planta  $i \in PL$  en el periodo  $t \in T$  [\$/periodo].

$CFOCD_{jt}$  = Costo fijo de operación del centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  [\$/periodo].

$GAMPD_{jt}$  = Gastos de amortización y depreciación del centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  [\$/periodo].

$CPFUE_{ipt}$  = Costo de penalización por fabricar una unidad extra  $p \in PT$  superando la capacidad de producción de la planta  $i \in PL$  en el periodo  $t \in T$  [\$/unidad de p].

$KPLPT_i$  = Capacidad de producción en la planta  $i \in PL$  para todos los productos  $p \in PT$  [Unidades de p/año].

$KFCDPT_j$  = Capacidad del flujo a través del centro de distribución  $j \in CD$  para todos los productos  $p \in PT$  [Unidades de p/año].

$PVPTN_{pkt}$  = Precio de venta del producto terminado  $p \in PT$  al cliente  $k \in C$  en el periodo  $t \in T$  [\$/Unidades de p].

$DEMCPT_{kpts}$  = Demanda del cliente  $k \in C$  del producto terminado  $p \in PT$  en el periodo  $t \in T$  y en el escenario  $s \in S$  [Unidades de p/ periodo].

$IIACD_j$  = Inversión inicial generada por la apertura del centro de distribución  $j \in CD$  [\$/].

$FP_p$  = Factor de peso por unidad de producto  $p \in PT$  [ $\frac{und}{kg}$ ]

$WACC$  = Costo del capital invertido por la compañía.

$TIMPR$  = Tasa de impuesto de renta.

### *Variables de decisión*

#### *Variables Flujo*

$X_{ijpst}$  = Cantidad de producto terminado  $p \in PT$  enviado desde la planta  $i \in PL$  hacia el centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  y en el escenario  $s \in S$ . [Unidades de p / periodo].

$Y_{jkpst}$  = Cantidad de producto terminado  $p \in PT$  enviado hacia el cliente  $k \in C$  desde el centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  y en el escenario  $s \in S$ . [Unidades de p / periodo].

$V_{jj^*pst}$  = Cantidad de producto terminado  $p \in PT$  a enviar hacia centro de distribución  $j^* \in CD_{RE}$  desde centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  y en el escenario  $s \in S$ , donde  $j \neq j^*$ . [Unidades de p / periodo].

$I_{pjst}$  = Cantidad de inventario final de producto terminado  $p \in PT$  almacenado en el centro de distribución  $j \in CD$  en el periodo  $t \in T$  y en el escenario  $s \in S$ . [Unidades de p / periodo].

$Kad_{its}$  = Capacidad adicional de producción extra a considerar en la planta  $i \in PL$  en el periodo  $t \in T$  y el escenario  $s \in S$ .

#### *Variables Binarias*

$A_j = 1$  si se decide mantener abierto el centro de distribución  $j \in CDA$ , 0 de lo contrario.

$L_j = 1$  si se decide invertir en la construcción de un centro de distribución  $j \in CDL$ , 0 de lo contrario.