

Diseño de Cadena de Suministro Responsable Económica, Ambiental y Socialmente Utilizando el Algoritmo de Evolución Diferencial Multiobjetivo.

Alhely González Luna

<https://ieeexplore.ieee.org/document/6962683>

Las redes de cadena de suministro implican una gran cantidad de inversiones y, por ello, se espera que funcionen durante un largo horizonte temporal de manera económica. Sin embargo, considerar únicamente aspectos económicos no puede asegurar un estado óptimo en el diseño de las redes, y en la actualidad es necesario tener en cuenta otros aspectos que influyen, como los factores ambientales y sociales. En esta investigación, proporcionamos un marco matemático integral para el diseño de redes de cadena de suministro basado en los tres factores mencionados.

Debido a la naturaleza NP-Hard del problema y dado que es un modelo multiobjetivo, se aplicará una metaheurística, concretamente la evolución diferencial multiobjetivo, para encontrar soluciones de Pareto. Para ajustar los parámetros del algoritmo, aplicamos la metodología de superficie de respuesta.

Hoy en día, el transporte de bienes se ha convertido en una actividad de alto impacto. En efecto, debido a la globalización, los productos terminados o semiterminados suelen recorrer largas distancias. Además, a causa de la crisis económica, muchas empresas no pueden sobrevivir por sí solas y deben incrementar su colaboración con proveedores y clientes. Las organizaciones resultantes, más complejas pero más eficientes, son las cadenas de suministro. Una cadena de suministro es una red de actividades que incluye todos los procesos de aprovisionamiento, planificación de la producción y distribución de productos hacia los destinos finales de consumo.

Una de las decisiones más importantes en el diseño de redes de cadena de suministro es la definición de la ubicación geográfica óptima de las instalaciones requeridas. Además, están asociados a otras políticas como los programas de transporte. Existen otros factores que también tienen un impacto significativo en el diseño de las redes de cadena de suministro. En esta línea, debido a la relación de las actividades de la cadena con la sociedad y los problemas sociales, ignorar estos factores puede llevar a los responsables de la toma de decisiones a elegir soluciones no óptimas

Para el modelo propuesto, desarrollamos las capas de la red de cadena de suministro y aplicamos el algoritmo de evolución diferencial multiobjetivo para encontrar soluciones en el frente de Pareto. Para ajustar los parámetros del algoritmo, se emplea el método de superficie de respuesta (RSM).

En nuestra red, se considera una cadena de suministro directa e inversa con múltiples productos:

- En el flujo directo, los productos nuevos se distribuyen hacia los destinos finales de uso.
- En el flujo inverso, los productos usados y al final de su vida útil son enviados a centros de recolección y reciclaje.

Enfoque del Protocolo de Kioto

- Se enfoca en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂.
- El protocolo busca una reducción promedio del 5% en las emisiones respecto a los niveles de 1990 para el año 2012 en 37 países industrializados.
- Cada empresa o país tiene un límite permitido de emisión. Si se excede, se debe pagar una penalización.
- Aquellos que estén por debajo de sus metas pueden vender su excedente a otros que hayan excedido los límites establecidos.

Concepto de instalaciones ecológicas

- Cada instalación requiere un cierto nivel de energía para operar.
- Se considera un coeficiente asociado a la emisión de CO_2 en cada ubicación potencial.
- El objetivo es seleccionar sitios más “verdes” y limpios para minimizar las emisiones.

Eco-indicador 99

- Método para evaluar el impacto ambiental de productos o actividades.
- Permite a los diseñadores comparar el impacto total entre diferentes alternativas de diseño

La emisión total de CO₂ del modelo se calcula como:

- Suma de las emisiones del transporte y las operaciones en instalaciones.
- Si se excede el límite establecido, se incurre en un pago obligatorio.
- Si se está por debajo del límite, se puede vender el excedente de emisiones a otras empresas o países.

Para incorporar factores de responsabilidad social corporativa:

- Se introduce el concepto de “insatisfacción social” como criterio de evaluación.
- Se convierte la insatisfacción en un parámetro cuantificable mediante cuestionarios distribuidos entre los interesados.
- La insatisfacción puede surgir por ruido, tráfico y contaminación en las ubicaciones propuestas.

Modelo matemático

Indices:

p : Indices of the potential locations for warehouses.

i : Indices of the product types.

k : Indices of the costumers.

u : Indices of the manufacturers.

c : Indices of the potential locations for collection centers.

r : Indices of the potential locations for recycling centers.

Parameters:

fw_p = Fixed cost of opening a warehouse in potential location p .

fc_c = Fixed cost of opening a collection center in potential location c .

fr_r = Fixed cost of opening a recycling center in potential location r .

d_{ik} = Demand of product i by customer k .

$Capw_p$ = Total capacity of storing in warehouse p .

$Capc_c$ = Total capacity of collecting the un-used products in collection center c .

$Capr_r$ = Total capacity of recycling the un-used products in recycling center r .

$Capm_{ui}$ = Total capacity of sending the product type i from the manufacturer u .

C_{pui} = Transportation cost for shipping one unit of product i from manufacturer u to warehouse location p .

C'_{ipk} = Transportation cost for shipping one unit of product i from warehouse location p to customer k .

C''_{ikc} = Transportation cost for shipping one unit of used product i from customer k to collection center c .

Modelo matemático

fr_r = Fixed cost of opening a recycling center in potential location r .

d_{ik} = Demand of product i by customer k .

$Capw_p$ = Total capacity of storing in warehouse p .

$Capc_c$ = Total capacity of collecting the un-used products in collection center c .

$Capr_r$ = Total capacity of recycling the un-used products in recycling center r .

$Capm_{ui}$ = Total capacity of sending the product type i from the manufacturer u .

C_{pui} = Transportation cost for shipping one unit of product i from manufacturer u to warehouse location p .

C'_{ipk} = Transportation cost for shipping one unit of product i from warehouse location p to customer k .

C''_{ikc} = Transportation cost for shipping one unit of used product i from customer k to collection center c .

C'''_{icr} = Transportation cost for shipping one unit of used product i from collection center c to recycling center r .

et_{pui} = CO₂ emission of shipping one unit of product i from manufacturer u to warehouse location p (in tons).

et'_{ipk} = CO₂ emission of shipping one unit of product i from warehouse location p to customer k (in tons).

et''_{ikc} = CO₂ emission of shipping one unit of product i from customer k to collection center c (in tons).

et'''_{icr} = CO₂ emission of shipping one unit of product i from collection center c to recycling center r (in tons).

rt_{ik} = Percentage of returning the product type i from customer k .

E_w = Total amount of required energy for warehouse

ϵ'_c = Total amount of required energy for collection center c (in KWH).

ϵ''_r = Total amount of required energy for recycling center r (in KWH).

eo_p = CO₂ emission of a warehouse location p per using 1KWH of operation (in tons).

eo'_c = CO₂ emission of a collection center c per using 1KWH of operation (in tons).

eo''_r = CO₂ emission of a recycling center r per using 1KWH of operation (in tons).

$probw_p$ = Fraction of unsatisfied people about locating a warehouse in location p .

$probc_c$ = Fraction of unsatisfied people about locating a collection center in location c (in percentage).

$probr_r$ = Fraction of unsatisfied people about locating a recycling center in location r (in percentage).

$emax$ = Maximum amount of carbon dioxide emission that can be emitted which is allocated by the government.

Fe = Cost of carbon credit in \$/ton.

Decision Variables:

Y_p = 1 if a warehouse is located in location p and 0 otherwise.

Z_c = 1 if a collection center is located in location c and 0 otherwise.

O_r = 1 if a recycling center is located in location r and 0 otherwise.

X_{ipk} = Quantity of product i shipped from location p to costumer k .

Q_{ikc} = Quantity of product i shipped from costumer k to collection center c .

L_{icr} = Quantity of product i shipped from collection center c to recycling center r .

$VARe$ = The current emission of carbon dioxide in tons.

The mathematical multi-objective formulation is as follow.

Min

$$\begin{aligned} Z_1 = & \sum_p Y_p f w_p + \sum_c O_c c + \sum_r Z_r f r_r + \\ & \sum_i \sum_p \sum_u C_{pui} W_{pui} + \sum_i \sum_k \sum_p C'_{ipk} X_{ipk} + \\ & \sum_i \sum_k \sum_c C''_{ikc} Q_{ikc} + \sum_i \sum_c \sum_r C'''_{icr} L_{icr} + fe(VARe - \\ & emax) \end{aligned} \quad (1)$$

$$Z_2 = \sum_p probw_p Y_p + \sum_c probc_c Z_c + \sum_r probr_r O_r \quad (2)$$

s.t

$$\sum_p W_{pui} \leq Capm_{ui} \quad \forall u, i \quad (3)$$

$$\sum_p X_{ipk} = d_{ik} \quad \forall k, i \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_k \alpha_i X_{ipk} \leq Capw_p Y_p \quad \forall p \quad (5)$$

$$\sum_u W_{pui} = \sum_k X_{ipk} \quad \forall p, i \quad (6)$$

$$\sum_c Q_{ikc} = r_{tik} d_{ik} \quad \forall k, i \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_k \beta_i Q_{ikc} \leq Capc_c Z_c \quad \forall c \quad (8)$$

$$\sum_k Q_{ikc} = \sum_r L_{icr} \quad \forall i, c \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_c \beta_i L_{icr} \leq Capr_r O_r \quad \forall r \quad (10)$$

$$\sum_p \sum_u \sum_i et_{pui} W_{pui} + \sum_i \sum_k \sum_p et'_{ipk} X_{ipk} +$$

$$\sum_i \sum_k \sum_r et''_{ikc} Q_{ikc} + \sum_i \sum_c \sum_r et'''_{icr} L_{icr} +$$

Las ecuaciones primera y segunda corresponden a las funciones objetivo:

- La primera minimiza el costo total, que incluye:
 - Costo fijo de construcción de almacenes, centros de recolección y reciclaje.
 - Costos variables de transporte entre los niveles de la red de cadena de suministro.
 - Costo de emisiones de carbono asociado al comercio de carbono (última línea).
- La segunda minimiza la insatisfacción social asociada a la localización de las instalaciones, considerando aspectos de responsabilidad social.

Algoritmo

- Evaluar la población inicial P formada por individuos aleatorios.
- Mientras no se cumpla la condición de parada, hacer lo siguiente:
 - Para cada individuo X_i , ($i = 1 \dots NP$) de P , repetir:
 - Crear un candidato U_i a partir del padre X_i .
 - Evaluar el candidato.
 - Si el candidato domina al padre, el candidato reemplaza al padre. Si el padre domina al candidato, el candidato es descartado.
 - De lo contrario, el candidato se añade a la población.
 - Si la población tiene más individuos que el tamaño de la población NP , truncarla.
 - Evaluar los individuos en P .
- En este algoritmo, definimos una población factible de soluciones según las restricciones del modelo y las evaluamos. Mientras no se cumpla el criterio de parada del algoritmo, algunos pasos iterativos continúan. De esta manera, de cada solución padre de P , generamos las soluciones candidatas; las soluciones se forman utilizando los operadores del algoritmo, es decir, mutación y cruce.

- En la mutación, se seleccionan tres soluciones aleatoriamente y la diferencia de dos de ellas se multiplica por un coeficiente entre 0 y 1, luego el resultado se añade a la tercera solución objetivo.
- Para crear diversidad, se aplica el operador de cruzamiento sobre las nuevas soluciones obtenidas por mutación. Para una solución, necesitamos generar un número aleatorio. Si este número es menor que el valor predefinido de CR , mantendremos el resultado de la mutación y, de lo contrario, lo reemplazaremos por la solución padre.

- En la situación en que el tamaño de la población aumenta, el algoritmo debe requerir una reducción del tamaño de su población. La truncación de la población aumentada consiste en ordenar a los individuos con clasificación no dominada y luego evaluar a los individuos del mismo frente con la métrica de distancia de aglomeración.

- Evaluamos la viabilidad del modelo utilizando el software General Algebraic Modeling System (GAMS).
- Después de recibir la no viabilidad del espacio de soluciones, aplicamos el algoritmo en MATLAB.
- Para obtener los parametros del algoritmo, realizamos este ajuste utilizando la metodología de superficie de respuesta (R.S.M) en el software Expert Design.

Problem Size	
I=10, K=85, P=8, U=8, C=8, R=8	
Parameters	Value of RSM Method
F	0.7
CR	0.7
Npop	39
Maxit	30

- En este sentido, consideramos uno de los parámetros más importantes del modelo, la demanda de los clientes, y estudiamos el modelo bajo los cambios de demanda que se expresan en porcentaje.
- Como se muestra en la Fig. 2, el objetivo relacionado con los costos es más sensible que el objetivo relacionado con la insatisfacción social.

TABLE II
PARAMETERS SOLUTION OF THE OBJECTIVES

Pareto Solution	Objective Number 1	Objective Number 2
1	151289.69	5.84
2	151658.48	5.71
3	153233.09	5.7
4	155117.92	5.63
5	159307.11	5.61
6	151289.69	5.84

- Podemos concluir que al aumentar las demandas y/o el número de clientes, los costos totales y también la insatisfacción total aumentan.
- Además, con respecto a los conceptos de costos sociales en el diseño de la cadena de suministro, podemos concluir que los lugares con el nivel mínimo de insatisfacción imponen más costos en el sistema, lo que proporciona perspectivas de gestión.
- Durante nuestra investigación, todos los resultados fueron obtenidos en una notebook con procesador Intel[®] Core i7, 2.7 GHz.

- En esta investigación se presentó un modelo matemático multiobjetivo con factores económicos, ambientales y de responsabilidad social.
- Para superar la brecha, además de aplicar el protocolo de Kioto y edificios verdes, definimos un nuevo concepto de responsabilidad social corporativa en el marco de la insatisfacción social.
- Debido a la naturaleza multiobjetivo y NP-Hard del modelo, se aplica el algoritmo DEMO y ajustamos los parámetros del algoritmo mediante el método RSM.
- Para investigaciones futuras, proponemos considerar el modelo con horizontes de tiempo multi-periodo.