

# Distribución óptima de GLP en polductos

José Luís Risco-Martín, José A. López-Orozco,  
Jesús M. de la Cruz, Bonifacio Andrés-Toro  
Ingeniería de Sistemas y Automática  
Universidad Complutense de Madrid

## **1. Introducción**

Es de naturaleza humana el esforzarse para buscar las mejores soluciones, por ejemplo a la hora de mejorar el rendimiento en el diseño de redes [1] [2], obtener una respuesta óptima en los sistemas de tiempo real [3], maximizar los beneficios en inversión [4] o planificar los sistemas de manufacturación en tiempo óptimo [5]. En todos los casos se realiza la búsqueda de la mejor alternativa, búsqueda basada en sistemas multicriterio sujetos a restricciones impuestas por el entorno.

En los últimos años miembros del Departamento de Computadores y Automática de la Universidad Complutense, dentro del proyecto CICYT DPI2002-02924 titulado “Estrategias de control de redes de distribución de gas”, hemos estudiamos el problema de planificación temporal en redes de polductos que consiste en minimizar el tiempo en satisfacer la demanda y el número de cambios de tipo de producto a lo largo de los polductos [6].

Este problema está incluido en los Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos (DEDS). Estos sistemas se controlan mediante sucesos, son asíncronos, en la mayoría de los casos fabricados por el hombre y se controlan mediante reglas. Ejemplos de DEDS son las redes de computadores, sistemas de transporte y sistemas de manufacturación.

La representación matemática de estos sistemas y un espacio de búsqueda intratable son las dos mayores dificultades que presentan los problemas de optimización tipo DEDS. Sistemas tales como un aeropuerto o las redes de computadores son difíciles de representar mediante

modelos matemáticos. Es más, el tamaño de las soluciones de estos problemas crece exponencialmente con el problema. Por ello estos sistemas pertenecen frecuentemente al conjunto de problemas NP-duro.

En este artículo describimos la metodología utilizada para resolver la optimización en poliductos y exponemos los resultados obtenidos.

## **2. Descripción del problema**

Los poliductos son redes de tuberías destinados al transporte de hidrocarburos o productos derivados del petróleo. A diferencia de los oleoductos convencionales, que transportan sólo petróleo crudo, los poliductos transportan una gran variedad de combustibles procesados en las refinerías: keroseno, naftas, gas oil, etc. El transporte se realiza en paquetes sucesivos. Un paquete es una cantidad variable del mismo tipo de producto ubicado a lo largo de un poliducto. Un poliducto largo puede contener cuatro o cinco productos diferentes en distintos puntos a lo largo de su recorrido (Figura 1). Los puntos de entrada de productos o fuentes de suministro a los poliductos suelen ser directamente las refinerías o bien puertos de descarga de barcos procedentes de refinerías. Los puntos de entrega son terminales de recepción o estaciones intermedias ubicadas a lo largo de la ruta y que disponen de tanques de almacenamiento. A condición de que se cumplan ciertas restricciones entre la ordenación de los paquetes, el nivel de mezcla de los sucesivos productos afecta sólo a una mínima fracción, que puede recuperarse como producto de menor calidad.



Figura 1. Poliducto.

Los poliductos de una determinada área geográfica (región, país, etc.) están intercomunicados entre sí formando redes de poliductos. Para impulsar los productos existen bombas repartidas estratégicamente a lo largo de la red. Desde un punto de vista operativo una red de poliductos

estará constituida por una serie de nodos con capacidad de almacenamiento, y una serie de arcos, los poliductos, que conectan entre sí los nodos. Los nodos en general tendrán capacidad de suministro, almacenamiento y recepción de productos. La mayoría de los poliductos son unidireccionales, pero por motivos de flexibilidad operativa también pueden existir poliductos bidireccionales. La topología de estas redes puede ser muy variada, dependiendo de la actividad petrolífera y las condiciones geográficas de la región.

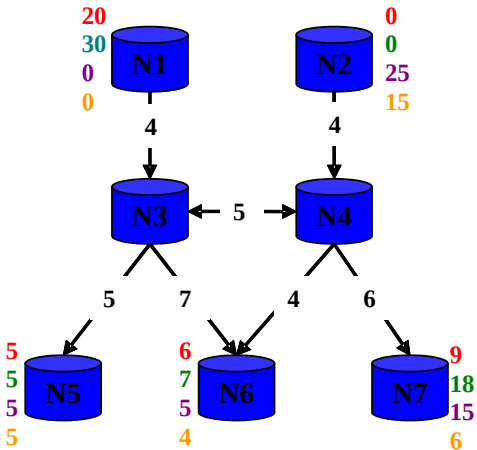


Figura 2. Esquema de una red de poliductos.

La Figura 2 ilustra un esquema de una red. Los arcos representan los poliductos, uno de ellos bidireccional. El número que aparece sobre los arcos representa los tramos de cada poliducto. Un tramo es la distancia que recorre una unidad de producto en una unidad de tiempo. Los números que aparecen al lado de N1 y N2 representan el almacén inicial de cada tipo de producto. Los números que aparecen al lado de N5, N6 y N7 representan su demanda.

A nivel logístico, el problema que se plantea en las redes de poliductos es el de la planificación temporal del transporte de diferentes productos desde nodos fuentes (oferta) a nodos destino (demanda) pasando por una serie de nodos intermedios. La planificación debe cumplir un conjunto de restricciones temporales, relativas a las fechas mínima y máxima de entrega de los productos. También deberá cumplir las restricciones relativas a la disponibilidad de productos en las fuentes, y las físicas derivadas de la utilización de los

recursos de la red. Se suele plantear, además, una medida de la calidad de la solución en términos de la minimización del intervalo total del tiempo de la planificación, y de la apropiada ordenación de los paquetes para conseguir interfases sin mezcla. Dicha medida se suele formular como una función multiobjetivo en el problema de optimización. La capacidad de almacenamiento de los nodos intermedios se puede utilizar como elemento estratégico para el cumplimiento de las restricciones temporales y la optimización de la función objetivo.

En el problema considerado se han realizado algunas aproximaciones. En primer lugar se supone que todos los poliductos tienen las mismas propiedades físicas (diámetro, rozamiento, presión, etc.). En segundo lugar se han discretizado los poliductos en tramos y se han normalizado las cantidades transportadas de cada tipo de producto así como su velocidad de desplazamiento, de forma que una unidad de un determinado tipo de producto recorre un tramo de poliducto por unidad de tiempo.

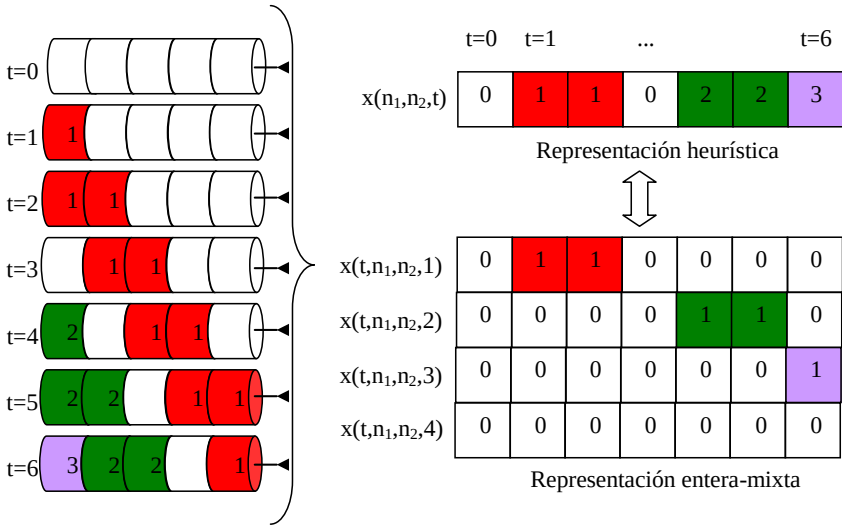


Figura 3. Esquema de modelado de un poliducto en el tiempo.

La Figura 3 representa el modelado de un poliducto suponiendo que este transporta cuatro tipos de producto. Además se ilustran las variables de decisión que modelan el poliducto según la estrategia de optimización, ya sean técnicas heurísticas o programación entera mixta. Al menos en cuanto a la programación entera se refiere, el modelado y la optimización del problema se ha realizado con la herramienta EDIPO [7] [8] [9].

### **3. Edipo**

El sistema gráfico desarrollado, genéricamente denominado EDIPO (EDItor de Problemas de Optimización), es una herramienta que sirve para modelar y resolver de forma gráfica cualquier problema de optimización que se pueda representar como un grafo [9]. En particular, cualquier red de transporte se puede representar como un grafo, y por tanto, se puede utilizar EDIPO para resolverlo.

Para ello, EDIPO consta de un conjunto base llamado metamodelo (Figura 4). El metamodelo es un conjunto de elementos que intervienen en un problema de optimización. En el metamodelo cada elemento está definido con cierto nivel de abstracción. Ejemplos de elementos del metamodelo son: arco de transporte, poliducto, nodo de producción, nodo intermediario, etc.

El motor software de EDIPO genera editores gráficos a varios niveles. En un primer nivel genera el *Editor de modelos*. Por modelo se entiende un subconjunto de elementos del metamodelo particularizados para un fin común. Por ejemplo, con el Editor de modelos se puede extraer un poliducto del metamodelo y asignarle ciertas características: si es bidireccional o no, la velocidad de transporte del poliducto, etc.

En un segundo nivel de detalle EDIPO genera el *Editor de instancias*. Con este editor gráfico se pueden modificar los datos del problema de forma más sencilla e intuitiva.

En el mismo nivel de detalle genera el *Visualizador de soluciones*. Con esta herramienta se visualizan los datos relativos a la solución del problema.

Como pasos intermedios entre la creación del modelo, la edición de los datos del problema y la visualización de los resultados se utilizan las *Transformaciones*. En EDIPO se define por cada elemento del metamodelo dos transformaciones: La primera es la que define la representación de cada elemento en la base de datos, es decir, las tablas y los campos. La

segunda es la que define la porción de algoritmo de optimización de cada elemento, es decir, las restricciones y los términos de la función objetivo.

Con ello, para resolver un problema con EDIPO se siguen los pasos siguientes: se crea el modelo, se genera la base de datos que albergará los datos del problema, se genera el editor de la base de datos, el algoritmo de optimización, se resuelve el problema y se genera el visualizador de soluciones.

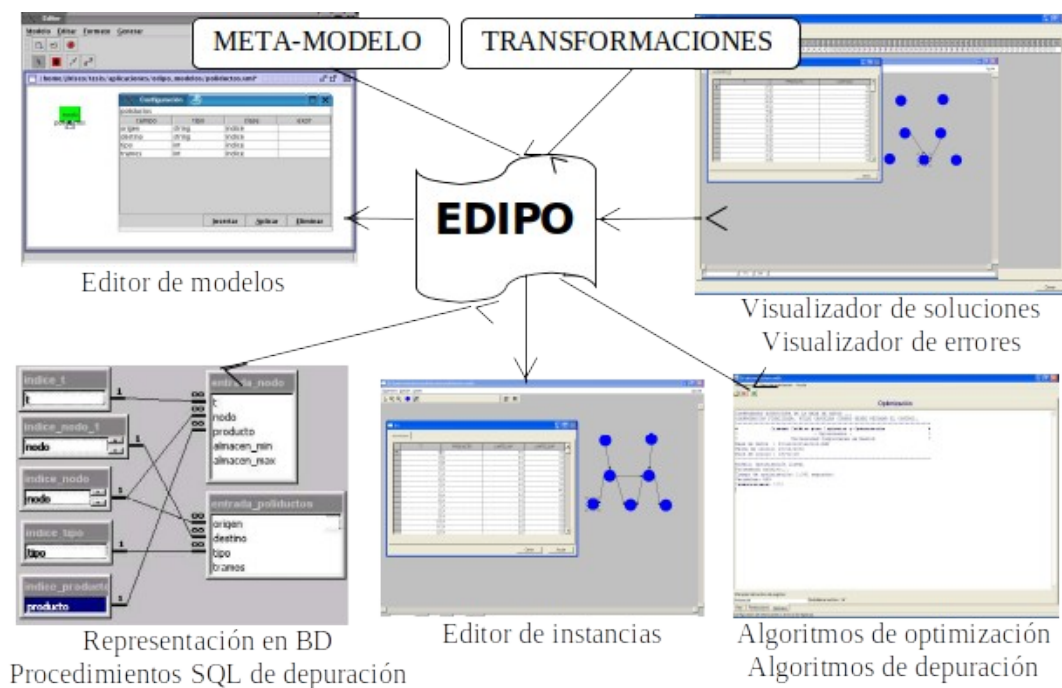


Figura 4. Arquitectura de EDIPO.

En este artículo utilizamos EDIPO para resolver la optimización del transporte en la red de poliductos de la Figura 2. En [7] se puede ver otro ejemplo de aplicación de la herramienta.

#### 4. Modelo gráfico

Los elementos que intervienen en la red en estudio son: nodos de distribución con capacidad de almacenamiento y poliductos. Tanto el nodo de distribución como el poliducto está incorporado en el metamodelo de EDIPO, de forma que pueda utilizarse para el modelado de este tipo de redes. En la Figura 5 se representa el modelo del sistema. En este caso no se distingue entre nodos de distinto tipo, ya que todos presentan restricciones de

almacenamiento, y por lo tanto todos pueden ser demandantes, intermediarios o fuentes. En la figura 5 se están editando las propiedades de un poliducto, que en este caso se caracteriza por cuatro elementos: origen y destino del poliducto, tramos por los que estará formado y si es direccional o bidireccional.

En este caso en las transformadas del poliducto, ya sea para obtener la base de datos o el modelo de optimización, se han considerado implícitos el tiempo y el producto transportado, asociándolo a los nodos que conecta el poliducto. Por lo tanto la réplica de elementos en tiempo y en producto se realizará únicamente para los nodos.

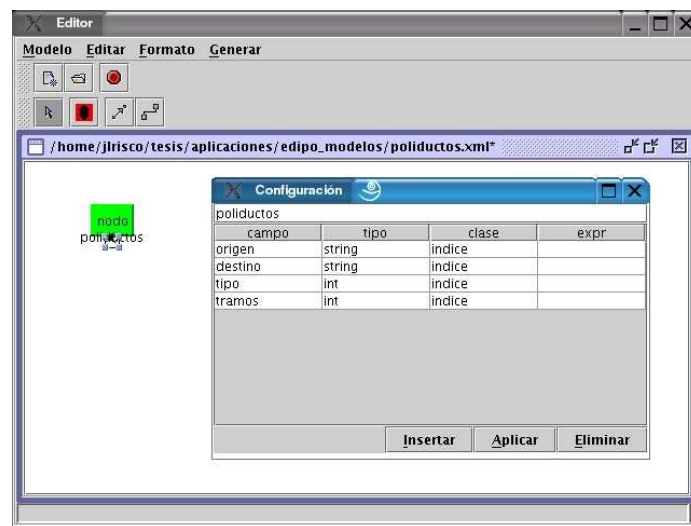


Figura 5. Modelo del sistema.

## 5. Base de datos

Una vez creado el modelo con EDIPO, se aplica la transformación que genera la base de datos. En la Figura 6 se muestra el diagrama relacional de la base de datos obtenida.

Esta transformación genera un conjunto de consultas SQL y las guarda en un archivo de texto. Después, el usuario puede ejecutar este conjunto de consultas en el sistema de gestión de bases de datos que desee.

En este caso optamos por utilizar Microsoft Access. En la Figura 6 se muestra el diagrama relacional obtenido.

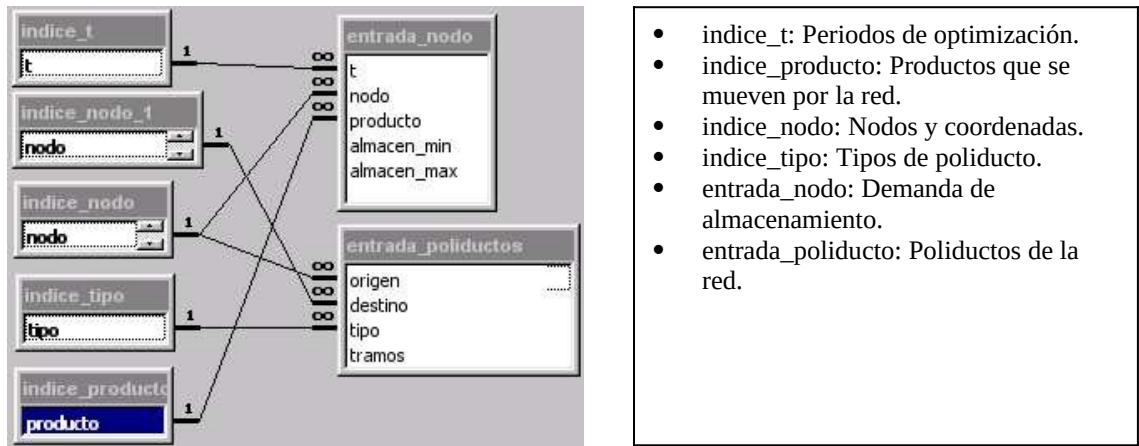


Figura 6. Diagrama relacional.

Aunque no se han incluido en la Figura 6, además de las tablas de entrada, se generan las correspondientes tablas de salida para almacenar el valor de las variables.

Una vez generada la base de datos, con EDIPO se carga el Editor de instancias que se corresponde con el modelo creado. Con el Editor de instancias se pueden consultar los datos de las tablas de la base de datos de forma intuitiva.

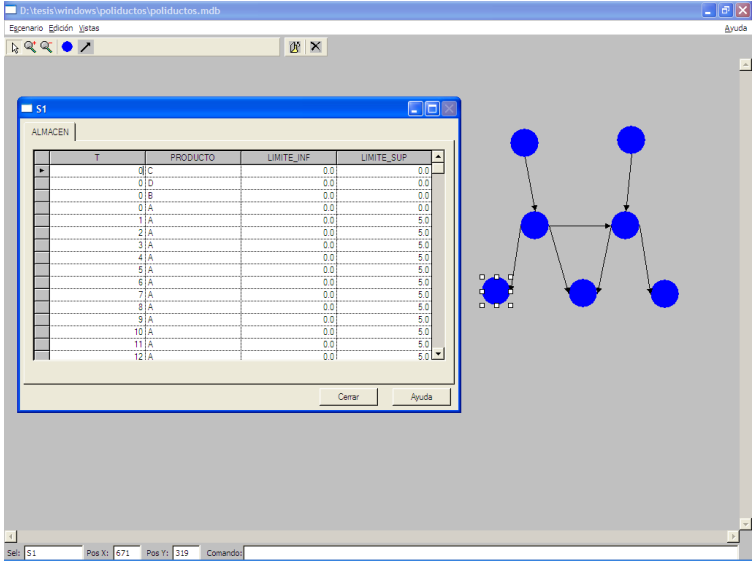


Figura 7. Editor de instancias.

En nuestra red de poliductos, los datos los hemos introducido con la utilización de este editor. En la Figura 7 se ilustra la edición de los datos correspondientes a uno de los nodos de la red. Picando dos veces sobre el nodo aparece una ventana que filtra en la base de datos los

correspondientes a este elemento. Con ello se introduce la cantidad de producto que debe tener en su almacén el nodo en edición en cada instante de tiempo.

## **6. Optimización**

Una vez completado el modelo de datos se genera el modelo de optimización aplicando desde EDIPO la transformación correspondiente sobre el modelo gráfico. El resultado es una optimización multiobjetivo, ya que se minimiza el tiempo en que se satisface la demanda y el número de cambios de tipo de producto para que no se produzcan demasiada mezcla (lo que denominamos *fragmentación o número de paquetes*).

Para resolver un problema de optimización con múltiples objetivos en EDIPO se utiliza el *Método de la restricción* [10]. El método de la restricción consiste en resolver la optimización en varias etapas.

En una primera etapa se optimiza sólo el tiempo. La optimización en tiempo es un problema que se puede resolver en un tiempo de cómputo finito. Con esta etapa se consigue el tiempo óptimo en que se puede satisfacer la demanda.

En la segunda etapa se optimiza la fragmentación, aunque limitamos el tiempo de satisfacción de la demanda a lo que ha arrojado la etapa anterior más una cantidad  $\epsilon$ . Cuanto mayor sea esta cantidad más fácil le resultará al optimizador encontrar soluciones factibles y por contra, mayor será el tiempo de satisfacción de la demanda obtenido.

El problema de la fragmentación es NP-Duro, especialmente complejo cuando la red presenta poliductos bidireccionales como el caso que nos ocupa, por lo que encontrar la solución óptima puede resultar imposible. Por ello se configura CPLEX para que no busque el óptimo en primer lugar, sino que se detenga cuando encuentre la primera solución factible.

Hecho esto, y tras la primera solución factible, se vuelve a ejecutar la optimización anterior, pero en este caso se impone como fragmentación máxima la ya obtenida. De este modo se van obteniendo soluciones paulatinamente mejores.

## 6.1. Datos del problema

El problema en estudio es el representado en la Figura 2. Y se escogen los datos de forma que la solución óptima necesite transporte en los dos sentidos de los poliductos bidireccionales.

La configuración inicial de la red está reflejada en la Tabla 1. En ella MIN representa el límite inferior de almacén a lo largo de toda la optimización, TINI representa la cantidad almacenada en  $t = 0$ , MAX representa la capacidad máxima de almacenamiento, y DEM representa la cantidad demandada. De la configuración inicial se desprende que es necesario que se produzca intercambio en los arcos bidireccionales.

Tabla 1. Configuración de la red.

PRODUCTO TIPO 1				
NODO	MIN	TINI	MAX	DEM
N1	0	20	35	0
N2	0	0	0	0
N3	0	0	0	0
N4	0	0	0	0
N5	0	0	20	5
N6	0	0	20	6
N7	0	0	20	9

PRODUCTO TIPO 2				
NODO	MIN	TINI	MAX	DEM
N1	0	30	35	0
N2	0	0	0	0
N3	0	0	0	0
N4	0	0	0	0
N5	0	0	20	5
N6	0	0	20	7
N7	0	0	20	18

PRODUCTO TIPO 3				
NODO	MIN	TINI	MAX	DEM
N1	0	0	0	0
N2	0	25	35	0
N3	0	0	0	0
N4	0	0	0	0
N5	0	0	20	5
N6	0	0	20	5
N7	0	0	20	15

PRODUCTO TIPO 4				
NODO	MIN	TINI	MAX	DEM
N1	0	0	0	0
N2	0	15	35	0
N3	0	0	0	0
N4	0	0	0	0
N5	0	0	20	5
N6	0	0	20	4
N7	0	0	20	6

Para la optimización de la red se utilizó el modelo multietapa, realizando en primer lugar una optimización en tiempo y en segundo lugar una optimización en fragmentación. Los resultados obtenidos en las sucesivas ejecuciones de la segunda etapa de optimización se reflejan en la Tabla 2. En ella se representa el número de iteraciones realizadas por CPLEX hasta obtener la solución factible dada. Se observa como va disminuyendo notablemente.

Como se puede observar el número de iteraciones a lo largo de las sucesivas optimizaciones no va aumentando aunque disminuya la fragmentación. Esto es debido a dos motivos. El primero que la nueva optimización impone que la fragmentación sea menor que en la

optimización anterior. El segundo que en CPLEX se puede definir cierta aleatoriedad en la búsqueda, de forma que no repita siempre el mismo proceso. Esto le hace “saltar” con cierta frecuencia en el árbol de soluciones. Esta es una característica propia del optimizador que se ha utilizado.

Tabla 2. Número de paquetes en la red.

ITERACIONES	FRAGMENTACIÓN
13959	107
40185	68
104437	52
51050	46
42713	33
91369	28

## **6.2. Visualización gráfica de la solución**

Una vez realizada la optimización, desde el visualizador de soluciones se pueden apreciar gráficamente los resultados de la optimización.

En la Figura 8 se ilustran los resultados del almacén de uno de los sumideros en la optimización en tiempo. El tiempo óptimo será el mínimo periodo en que los nodos sumidero satisfagan su demanda. En el ejemplo propuesto este periodo es  $T=66$ .

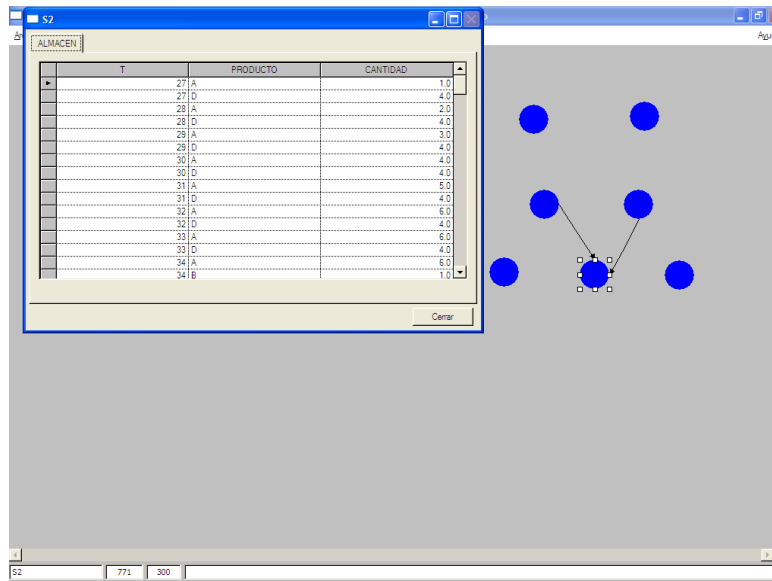


Figura 8. Optimización en tiempo.

En la Figura 9 se observa la evolución de uno de los poliductos en el tiempo. Estos datos se corresponden con la minimización en cambios de producto desde  $T=1$  hasta  $T=66$ .

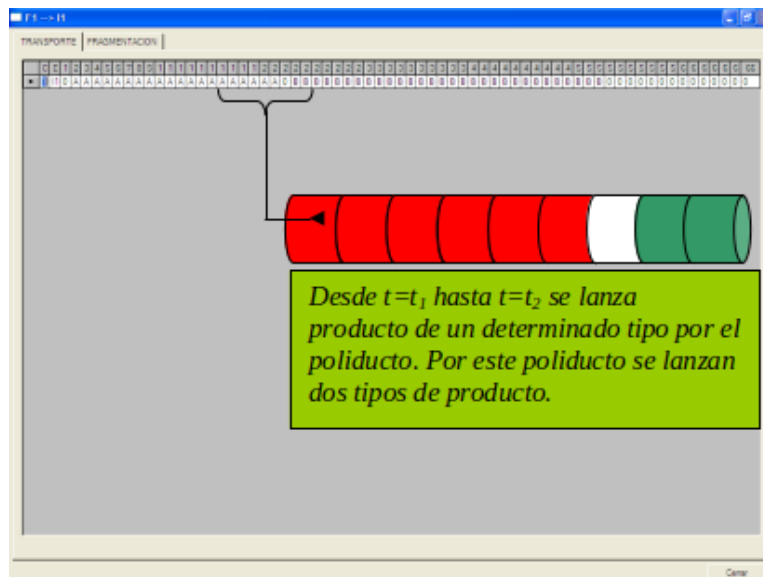


Figura 9. Evolución temporal de un poliducto.

Por otro lado, en la Figura 10 se observa la fragmentación en uno de los poliductos, en este caso 2. Esto significa que en el poliducto se lanzan dos paquetes de producto. Un paquete es una sucesión consecutiva de unidades de producto del mismo tipo.

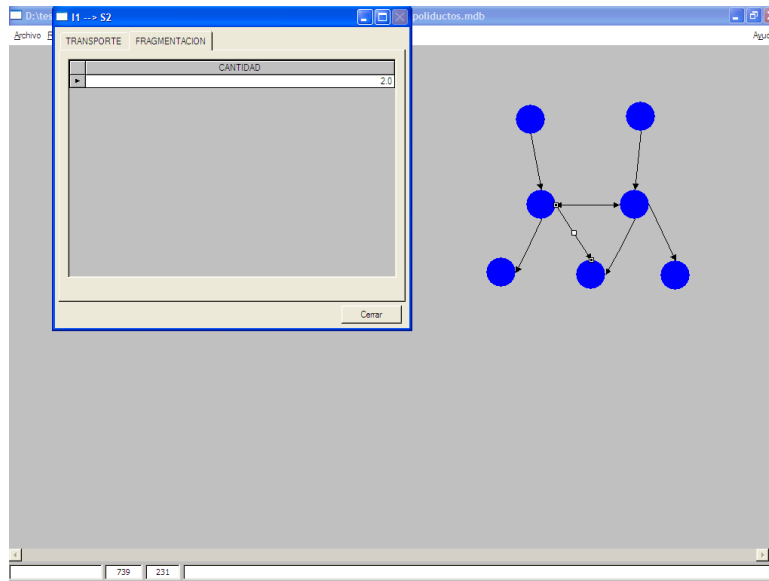


Figura 10. Fragmentación de un poliducto en el tiempo.

## 7. Modelo híbrido

Aunque dada la naturaleza del problema los resultados eran satisfactorios, decidimos acudir a técnicas heurísticas que combinadas con los resultados de las optimizaciones anteriores, nos proporcionarían mejores soluciones.

Para ello decidimos combinar EDIPO con EVOCOM [13], [14]. EVOCOM es una toolbox para MATLAB que implementa algoritmos de Computación Evolutiva que permiten realizar fácilmente optimizaciones mediante algoritmos genéticos.

Cada solución generada con EDIPO se le pasa al algoritmo genético para que la mejore. Con este procedimiento se mejora la fragmentación sustancialmente, [6], [11], [12], [13], [14]. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11. En el proceso de optimización, CPLEX proporciona al algoritmo genético las soluciones obtenidas tras un número de iteraciones configurables, de forma que este continúa con el proceso de optimización.

En la Figura 11 se muestra una comparativa entre los tres métodos: los dos optimizadores por separado y el algoritmo híbrido.

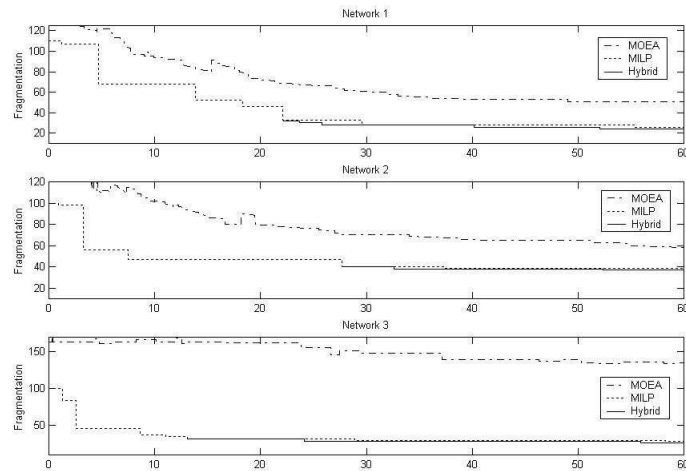


Figura 11. Programación entera-mixta y algoritmos genéticos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Li, N. Crowther, A dynamic routing scheme for multimedia traffic, in: Y. Wang, S. Panwar, S. Kim, H. Bernoni (Eds.), *Multimedia Communications and Video Coding*, Plenum Press, New York, 1995.
- [2] D. Li, L.H. Lee, Y.C. Ho, Vector ordinal optimization – a new heuristics approach and its application to computer network routing design problems, *International Journal of Operations and Quantitative Management* 5 (3) (1999) 211–230.
- [3] J.M. Gilbert, W. Yang, A real-time face recognition system using custom VLSI Hardware, manuscript, 1997.
- [4] N. Patsis, Application of ordinal optimization to the pricing of stock options, Ph.D. Thesis, Harvard University, 1997.
- [5] L.H. Lee, F.H. Abernathy, Y.C. Ho, Production scheduling for apparel manufacturing systems, *Production Planning and Control* 11 (3) (2000) 281–290.
- [6] J.M. de la Cruz García, J.L. Risco-Martín, A. Herrán González, P. Fernández Blanco, Hybrid Heuristic and Mathematical Programming in Oil Pipeline Networks, *Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation*, Portland, OR, USA, 2004.
- [7] J.A. López Orozco, J.L. Risco Martín, J.M. de la Cruz, B. Andrés-Toro, Sistema gráfico para logística y optimización, *Alimentación, Equipos y Tecnología*, 2004.
- [8] J.L. Risco Martín, J.M. de la Cruz García, B. Andrés-Toro, A. Herrán González, Entorno gráfico de modelado para problemas de optimización de sistemas a gran escala, *RIAI*, 2005.
- [9] Risco-Martín, J.L. Sistema Integrado de Gestión Logística Optimizada. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 2004.
- [10] K. Marriott, Peter J. Stuckey, *Programming with Constraints: An Introduction*, MIT Press, 2000.

- [11] J.L. Risco Martín, A. Herrán González, J.M. de la Cruz García, B. Andrés-Toro, Estrategias de funcionamiento de una red de distribución de gas: Optimización multiobjetivo, Ingeniería Química (421) 79-86, 2005.
- [12] J.M. de la Cruz, A. Herrán González, J.L. Risco Martín, B. Andrés Toro, Hybrid heuristic and mathematical programming in oil pipelines networks: Use of immigrants, Journal of Zhejiang University SCIENCE 6A(1) 9-19, 2005.
- [13] EVOCOM: <http://pc-isa2.dacya.ucm.es/evocom/>
- [14] E. Besada-Portas, J.A. López-Orozco, B. Andrés-Toro. A Versatile Toolbox for Solving Industrial Problems with Several Evolutionary Techniques. Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMME). Spain, March 2002