

Programación de oleoductos: presentación del problema y revisión de enfoques

Álvaro García Sánchez¹, Miguel Ortega Mier²

¹Área de Ingeniería de Organización. Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad, 30. 28911 Leganés, Madrid. alvaro.garcia@uc3m.es

²Unidad Docente de Organización de la Producción. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. miguel@ingor.etsii.upm.es

Resumen

El transporte de hidrocarburos por oleoducto es el medio que ofrece los costes variables más bajos así como un régimen de operación altamente fiable. Por estas razones, el volumen de productos transportados mediante oleoducto representa una proporción muy alta con respecto al total. Sin embargo, y pesar de la frecuencia de uso de este medio de transporte y de la importancia de la buena programación de los oleoductos, la literatura dedicada a este aspecto es relativamente escasa. Una de las posibles razones que justifica este hecho es la elevada complejidad del problema. En la presente comunicación se examinan los principales trabajos realizados. Dada la complejidad del problema, estos trabajos se caracterizan, y diferencian unos de otros, por el tipo de simplificaciones asumidas (ya sean de carácter topológico, relativas al tamaño del programa, al horizonte temporal considerado, a la operación del oleoducto o la manera en la que se estiman los índices relevantes que permiten evaluarla bondad de un programa). En la comunicación se examinan y comentan los artículos más relevantes sobre este tema y se valoran tanto sus ventajas como sus inconvenientes.

Palabras clave: programación, transporte, optimización.

1. Introducción

De entre todos los medios empleados para el transporte de hidrocarburos, el transporte por oleoducto ofrece los costes variables más bajos y, al mismo tiempo, un régimen de operación altamente fiable.

Por estas razones, el volumen de productos transportados mediante oleoducto representa una proporción muy alta con respecto al total. Sin embargo, y pesar de la frecuencia de uso de este medio de transporte y de la importancia de la buena programación de los oleoductos, la literatura dedicada a este aspecto es relativamente escasa. Una de las posibles razones que justifica este hecho es la elevada complejidad del problema.

La complejidad del problema está originada, por un lado, por su carácter combinatorio y, por otro, por las numerosas restricciones (de diferente naturaleza) y por dificultad de computar de forma precisa una función objetivo que permita evaluar de forma rápida y sencilla un determinado programa.

El transporte por oleoducto presenta una característica que no comparten otros medios de transporte. Esta particularidad consiste en que al bombear los diferentes productos por el oleoducto, no existe una superficie de separación entre cada par de paquetes contiguos y, cuando estos paquetes viajan a lo largo de trayecto, se mezclan en cierta medida y se forma una interfase de producto contaminado. Este fenómeno es de notable importancia ya que condiciona las restricciones de secuenciación de los diferentes productos.

2. Definición del problema. Complejidad

La definición de un programa consiste en la determinación, para cada uno de los posibles orígenes, de una secuencia de paquetes de productos, donde un paquete queda definido por el tipo de producto, el volumen, el reparto que se hace del mismo a cada uno de los posibles destinos y el caudal con el que se lanza aguas abajo.

En ocasiones, según la complejidad del problema, puede ser suficientemente satisfactorio encontrar un programa factible pero, en otras, puede ser interesante y viable obtener uno razonablemente bueno con respecto a algún criterio de bondad.

Desde el punto de vista de la factibilidad, es necesario tener presente un conjunto de restricciones que un programa debe respetar para que sea factible. A continuación se citan algunas de las más importantes:

- Los productos deben de estar disponibles en los tanques en los momentos oportunos para satisfacer la demanda de los diferentes clientes.
- Tanto las estaciones de almacenamiento como los diferentes terminales tienen capacidades de almacenamiento limitadas.
- Las refinerías no pueden producir por encima de su capacidad.
- Las estaciones de bombeo ofrecen caudales acotados entre el mínimo y máximo para la configuración del oleoducto.
- Las características de los productos hacen que, debido a posible la formación de producto contaminado, algunos productos nunca puedan programarse a continuación de otros ni que puedan entrar en contacto a lo largo de su recorrido, debido a que el tratamiento de las interfases que se forman comportan unos gastos desorbitados. En otros casos, el emparejamiento no es deseable pero hasta cierto punto admisible.
- Los oleoductos generalmente se emplean combinados con otros medios de transporte, de forma que puede ser necesario considerar los efectos que tienen estos otros medios sobre los niveles de stock y la satisfacción de la demanda en los diferentes terminales.
- El tiempo no disponible del oleoducto debido a las operaciones de mantenimiento puede ser relevante, en cuyo caso debe considerarse en la formulación del problema.

Desde el punto de vista de la función que permite evaluar la bondad de un programa, se pueden adoptar diferentes perspectivas. Por un lado, es necesario establecer cuáles son los elementos relevantes en dicha función. Los que típicamente son más relevantes son:

- Costes de bombeo y de mejorador de flujo. Dependiendo de los equipos de bombeo instalados y de los caudales deseados a lo largo del horizonte temporal, se obtendrán diferentes costes de consumo eléctrico. En ocasiones, para aumentar el caudal se añade una cierta cantidad de un aditivo conocido como mejorador de flujo, relativamente costoso.

- Costes asociados a la formación de interfases. Como se ha indicado, a lo largo del trayecto, los diferentes paquete se mezclan en cierta medida y se origina un cierto volumen de producto contaminado. Según la naturaleza de los productos que forman la interfase y del volumen de la interfase resultante, existen diferentes tratamientos con un coste determinado para cada par de productos.
- Coste de carencia. Si un programa admite algún tipo de retraso en el servicio a los clientes, sería necesario computar el coste asociado a dichas entregas retrasadas.
- Costes de almacenamiento. También se pueden computar los costes de almacenamiento de los productos en los diferentes nodos de la red.

Por otro lado, se debe seleccionar el grado de precisión para estimar los costes anteriores: puede ser suficiente un índice que ofrezca una estimación de un coste o puede ser necesario calcular el propio coste con la precisión deseada. Por ejemplo, para el caso del coste de las interfases, se pueden realizar desde cálculos precisos de carácter fluido-dinámico a otros mucho más sencillos de computar pero, a su vez, menos precisos.

3. Enfoques existentes. Simplificaciones

Dada la complejidad del problema, los autores que han abordado el problema, introducen algún tipo de simplificación, ya sea de carácter topológico, o relativo al tamaño del programa, o del horizonte temporal considerado, o bien introducen simplificaciones relativas a la operación del oleoducto o, como se ha comentado, admiten alguna simplificación en la estimación de los índices relevantes que permiten evaluar un programa.

Aunque a continuación se comenta en detalle el nivel de simplificación encontrado en la literatura, adelantamos a grandes rasgos las posibles fuentes de la misma:

- Simplificaciones de tipo topológico: en el extremo, el oleoducto más simple está formado por una cabecera y un terminal unidos por una tubería.
- Simplificaciones de las dimensiones del oleoducto: número de tramos, terminales, instalaciones intermedias, etc.
- Simplificaciones vía limitación del horizonte temporal a unas horas o unos días.
- Simplificaciones de algunas condiciones de operación del oleoducto: discretización de paquetes, cálculo de interfases, cálculo del caudal en los diferentes tramos, etc.
- Simplificaciones en la selección de los elementos relevantes que condicionan la búsqueda de un programa o en la estimación de los elementos relevantes
- Simplificaciones derivadas de la inexistencia de secuencias de productos prohibidos.
- Simplificaciones en el cálculo del tamaño y del coste asociado a la formación de de interfases de producto contaminado.

En el siguiente apartado se comenta en cada caso, qué tipo de simplificaciones se han asumido para abordar el problema.

4. Revisión de los principales trabajos

Para desglosar los enfoques existentes, se puede atender a dos criterios fundamentales: el tipo de técnica utilizada y el tipo de simplificaciones que se introducen en el modelo. A continuación se van presentando diferentes problemas (con sus diferentes simplificaciones) y las técnicas que se han propuesto para resolverlos. Junto con el comentario de los artículos se van describiendo a grandes rasgos las características de los diferentes enfoques. Dada la complejidad que se ha comentado en el apartado anterior, se observa que las formas de

abordar el problema se caracterizan por introducir alguna simplificación que permitan obtener algún tipo de solución.

En ocasiones, las simplificaciones asumidas facilitan el tratamiento del problema mediante técnicas exactas, como la programación lineal entera mixta. Existen en la literatura, incluso, propuestas de carácter más general relativos a la producción y el transporte de hidrocarburos orientados al desarrollo de métodos exactos, como es el caso de Pinto y Grossman (1998).

Por su lado, Hane y Ratliff (1993) comentan que los problemas de redes de transporte de agua, que comparten ciertas características (pero no otras esenciales) se han aplicado métodos de programación dinámica, programación no lineal y programación entera mixta. El objetivo de estos modelos es poder conocer si los parámetros de la red se comportan para un determinado instante de forma adecuada, pero no permiten estudiar la evolución del sistema a lo largo del tiempo. Sin embargo, estos modelos no son interesantes a efectos de programación.

Con respecto al problema específico de programación de oleoductos, Hane y Ratliff (1993) presentan una primera aproximación a la resolución del problema, consistente en programar envíos paquetes de productos ordenados de mejor a peor calidad, y al llegar al de menor calidad, programar envíos de paquetes ordenados de menor a mayor calidad. De esta manera que el contaminado siempre queda en el vertido al tanque de producto de menor calidad.

Uno de los posibles tratamientos del problema del oleoducto de topología lineal, consiste en considerar el tiempo como una variable discreta.

Rejowski y Pinto (2003) plantean un modelo de programación lineal entera mixta cuya función objetivo es la suma de los costes de bombeo, los de almacenamiento y los asociados a la formación de interfases. Plantean dos modelos. En el primero, no se permite la posibilidad de que una tubería alimente simultáneamente al terminal situado en su extremo final y al tramo que le sigue aguas abajo. En el segundo sí permite esta posibilidad. Para ambos modelos, los paquetes que se envían desde la cabecera deben ser múltiplos de una determinada cantidad. La aplicación práctica de estos modelos la realizan a un oleoducto con una refinería y cinco terminales, para un horizonte de programación de 75 horas, divididos en 15 periodos de 5 horas cada uno de ellos.

Tal y como está formulado el problema, el coste asociado a la generación de interfases no es función de parámetros realistas. En concreto, los costes asociados a la formación de una interfase dependen del par de productos que la originen pero, dada la manera en la que se computa el coste asociado a cada interfase, el resultado es que algunas interfases (correspondientes al mismo par de productos), aun permaneciendo durante el mismo tiempo en el oleoducto, dan lugar a costes distintos.

Rejowski y Pinto (2004) proponen una ampliación de su trabajo anterior. Introducen, por un lado, un conjunto de restricciones adicionales en relación con el hecho de que la formación de interfases es mucho mayor cuando los productos que forman la interfase no están en movimiento. Estas restricciones impiden que un determinado tramo del oleoducto se detenga (y, por lo tanto, a todos los anteriores a dicho tramo) mientras exista una interfase dentro del mismo. Por otro lado incorporan restricciones relativas al número mínimo de periodos que cada tramo debe permanecer operativo para garantizar el suministro de los productos demandados por cada una de los terminales. El nuevo modelo se aplica en diferentes

contextos de demanda, para un oleoducto con una refinería y cinco terminales para un horizonte de 75 horas.

Por su parte, Magatao et al. (2004) proponen un método de programación lineal entera para un problema con una refinería, una tubería y un puerto. Los buques llegan al puerto entregan a la refinería los diferentes tipos de derivados y cargan otros productos para transportarlos a otros destinos. El objetivo es minimizar el coste total asociado al tránsito de los productos. Los costes que se consideran en el modelo son: los costes de introducción de productos de separación entre cada dos hidrocarburos y los costes de bombeo. El modelo se aplica a un problema para un horizonte temporal de 25 horas.

Dentro del grupo de autores que tratan el problema de la programación de oleoductos lineales, existen algunos que optan por formular un modelo exacto de carácter continuo.

Cafaro y Cerdá (2003), igual que Rejowski y Pinto (2003), tratan de minimizar los costes asociados al bombeo, los costes de almacenamiento y los de formación de interfases para un oleoducto lineal, con la salvedad del tratamiento continuo del tiempo y sin hacer ninguna hipótesis sobre el tamaño de los paquetes (el volumen de estos puede tomar cualquier valor). La aplicación del modelo se realiza para un oleoducto con una cabecera y cinco terminales, por el que se transportan cuatro productos distintos. El horizonte temporal es de 75 horas. Los autores obtienen un resultado mejor que el de Rejowski y Pinto con un tiempo de computación mucho menor.

Cafaro y Cerdá (2004) proponen una ampliación del modelo planteado por Cafaro y Cerdá (2003) en el que se incorpora a posibilidad de que existan secuencias de productos no permitidas, se realiza un tratamiento más riguroso de los costes de bombeo y, por último, se incorporan algunas restricciones adicionales (de tipo “branch and bound”) de carácter redundante que aceleran el procedimiento de búsqueda.

Las ventajas de los modelos continuos frente a los discretos son, entre otras, las siguientes. En primer lugar, formulación de un menor número de variables binarias y, por lo tanto, la formulación de un modelo de menor complejidad. Esto se traduce en un tiempo de resolución menor, o en la posibilidad de estudiar horizontes temporales algo más largos (a pesar de esto, los dos casos de aplicación práctica que describen Cafaro y Cerdá (2004) consideran un horizonte temporal de 75 horas). Por último, el conjunto de soluciones es más amplio que en el caso de la formulación en tiempo discreto, por lo que es relativamente más probable que la solución obtenida sea mejor.

Por último, dentro del grupo de autores que se ocupa de la programación de oleoductos lineales, algunos eligen heurísticos en lugar de métodos exactos.

En este grupo se encuentra el trabajo de Sasikumar (1997) que, a pesar de la simplificación de la configuración del oleoducto (en su aplicación práctica trabaja con un oleoducto de una refinería y tres terminales), emplea un heurístico, al que denomina “beam search” para encontrar una solución factible. La técnica opera de manera iterativa; a partir de cada estado, descrito por el la existencias en la refinería, los terminales y la posición de los diferentes paquetes a lo largo del oleoducto, explora los diferentes estados a los que se puede llegar desde el de partida. Elimina estados que previsiblemente no son interesantes y evalúa los restantes. Un número de estos (al que denomina “tamaño” de la técnica) es seleccionado, y con ellos se realiza el mismo proceso. Al cabo de cuatro iteraciones, se selecciona el camino

de estados que ofrece un mejor resultado. Los estados se evalúan de acuerdo con el coste en el que se ha incurrido para llegar a dicho estado, el nivel de existencias de cada terminal y la medida en la que la demanda ha sido satisfecha hasta el momento, a lo que se le añaden penalizaciones por paradas o por violar restricciones no duras del problema. Tras la generación de nuevos estados a partir de uno dado, se realiza un control para eliminar las soluciones que no cumplen determinadas restricciones.

Los autores introducen dos restricciones adicionales. En primer lugar, utilizan secuencias de paquetes que tradicionalmente han funcionado y, en segundo, se proponen sólo diez posibles formas de reparto de un paquete entre los tres posibles destinos.

Igualmente, Mildilú et al. (2002) optan por un heurístico para obtener un programa suficientemente bueno (no óptimo) con respecto a la suma de los costes debidos a las penalizaciones por retraso en las entregas y los costes asociados a las paradas y arranques del oleoducto.

El método propuesto consta de un método constructivo de carácter ‘ávido’ (“greedy” según el término sajón), al final de cuya aplicación se obtiene una ordenación de los paquetes que se deben enviar y más una búsqueda local. A continuación se realiza una búsqueda local consistente en realizar cambios entre paquetes adyacentes mientras al realizar estos cambios se obtenga un programa mejor que el programa del que se partía.

En este problema, Mildilú et al. (2002) no incorporan de ninguna manera las consecuencias la formación de interfases, tampoco contemplan la posibilidad de que el flujo se ramifique (y se sirva producto tanto un terminal como aguas debajo de la misma simultáneamente). Por último, los autores proponen como posible desarrollo de interés el estudio de redes como el de oleoductos simples con una cabecera, donde la cabecera de algunos de ellos es una salida de otro oleoducto.

Hasta ahora se han comentado los estudios dedicados a oleoductos de carácter lineal. Otros autores, sin embargo, tratan de resolver problemas topológicamente más complejos. La complejidad de estos problemas es tal que los métodos exactos son difícilmente aplicables.

De Felice y Charles (1975) describen la utilización de un simulador para obtener el programa de un oleoducto con dos cabeceras, tres estaciones de bombeo, siete terminales y doce tuberías que conectan los elementos anteriores.

Una primera aplicación emplea reglas de programación que han ofrecido buen resultado ofrece, a partir de los datos de demanda de los clientes, un primer programa de envío. Los autores no describen cómo funciona este generador de programas. Los programadores pueden introducir modificaciones en este primer programa tentativo. El resultado se introduce en un simulador, de manera que los programadores pueden analizar los resultados que ofrece el programa seleccionado. Los programadores pueden realizar modificaciones al programa estudiado inicialmente hasta que se obtiene un programa satisfactorio. Los autores no proponen ningún modelo normativo, sólo ofrecen la herramienta para facilitar el trabajo de los programadores.

Hane y Ratliff (1993) representan el oleoducto mediante un grafo dirigido acíclico, en el que los nodos representan tanto cabeceras como terminales y los arcos representan los diferentes tramos del oleoducto. La dirección de cada arco determina el sentido del flujo a lo largo del

tramo correspondiente (no considera tramos reversibles). Aunque contemplan, dada la estructura en forma de red, la existencia de ramificaciones en del oleoducto, en la práctica, no permiten que el flujo se reparta en la entrega al terminal que corresponda y en la entrega al siguiente tramo del oleoducto aguas abajo. Se trata de entregar una determinada cantidad de producto a cada terminal, de manera que un programa consiste en una ordenación de paquetes y una trayectoria para cada uno de ellos. La función objetivo que dirige la búsqueda es el número de paradas en las que tiene que incurrir el oleoducto para satisfacer la demanda con el programa seleccionado. Se trata de hacer mínimo dicho número. Dado que los costes de bombeo y de mantenimiento están íntimamente relacionados con el número de veces que el oleoducto se detiene y arranca de nuevo, se introduce una función objetivo que, indirectamente, trata de minimizar dichos costes.

Aunque inicialmente realiza una serie consideraciones para el problema formulado de complejidad topológica relativamente elevada, los algoritmos los propone para oleoductos con una cabecera y con ramificaciones.

Existen algunas hipótesis que restan realismo al modelo. En primer lugar, no se consideran restricciones de capacidad en los terminales. Tampoco se tienen en cuenta tiempos de entrega de los productos en los terminales (y, por lo tanto, tampoco se incluyen costes de penalización por retrasos). Además, no se contabilizan de ninguna manera en la función objetivo los costes asociados a la formación de interfases ni los costes de almacenamiento. Los propios autores comentan la imposibilidad de aplicar su técnica a un caso real. Por todo de ello, los propios autores señalan la imposibilidad de aplicar directamente su técnica en un caso real, dadas las hipótesis introducidas en el modelo, aunque defienden el interés de la metodología subyacente en la resolución de su problema.

Campognara y De Souza (1996) tratan también oleoductos representados mediante grafos dirigidos. En este caso sí se incorpora la existencia de tramos reversibles. Este modelo es más realista que el de Hane y Ratliff (1993), ya que sí que considera capacidad limitada en los terminales, secuencias de productos no permitidas, fechas de entrega de las cantidades demandadas en cada terminal. Además, incorporan tiempos de parada dedicadas al mantenimiento de los equipos. Los autores tratan de encontrar un programa factible que haga mínimo los costes de bombeo.

En primer lugar, formulan un modelo matemático basado en teoría de grafos. Para un determinado instante se puede representar el oleoducto con un grafo. Es posible introducir el carácter dinámico del problema considerando tantos grafos como instantes, conectados de manera apropiada para representar las posibles transiciones que pueden dar lugar con el tránsito de los productos a lo largo de las tuberías. Para horizontes temporales superiores a un día no es posible encontrar la solución óptima, dada la complejidad introducida por la dimensión del problema.

A la vista de la imposibilidad de aplicar el método anterior, los autores proponen un método heurístico estructurado en tres etapas. En primer lugar, se generan lo que denominan órdenes; una orden es un paquete definido por el producto, la cantidad, el origen y el destino. En segundo lugar, se establecen rutas para cada una de las órdenes definidas en la etapa anterior, tratando de lograr que el número total de inversiones del sentido de flujo de los tamos sea lo menor posible. Y por último, se establece la secuencia de las órdenes, formulando el problema de forma análoga a la que se formula la programación de un conjunto de órdenes en un conjunto de máquinas, donde las tuberías quedan representadas por máquinas. Los autores

describen cómo operan estas etapas de manera conceptual pero no detallan de forma precisa cómo se obtiene el resultado de cada una de ellas.

Para el caso real estudiado, se resuelve el problema para un horizonte de 5 días, relajando las restricciones relativas a la satisfacción de la demanda, de manera que sólo se garantice la satisfacción de la demanda de los cuatro primeros días. De esta forma se obtiene un programa para los cuatro días siguientes, de manera que la empresa puede fijar los envíos, por supuesto, para el día siguiente. Si pasado un día se repite el procedimiento, se vuelve a obtener una programación factible para cuatro días y, de nuevo, la programación para el día siguiente. Cada vez que se obtiene un programa se necesita un tiempo de computación de ocho horas. De esta manera se resuelve el problema diario de programación del oleoducto. Pero no es posible obtener una programación para todo un mes (que es el horizonte que típicamente más interesante).

Camacho et al. (1990) estudian oleoductos con varios terminales y con ramificaciones. El objetivo en este caso no es programar el oleoducto, sino obtener la forma de operación adecuada de los diferentes equipos de bombeo para minimizar el coste eléctrico respetando las fechas de entrega de los productos en cada una de los terminales. Para obtener dicha solución se dispone como dato de partida de la secuencia de productos (cantidad y destino) que se debe enviar desde cada cabecera. En este caso, los instantes en los que los paquetes entran al oleoducto y los instantes en los que salen dependen de qué equipos de bombeo operan y con qué potencia a lo largo del horizonte temporal considerado.

Los autores describen cómo representar de forma inequívoca el estado del oleoducto en un determinado instante sabiendo, el volumen vertido y la configuración de los equipos de bombeo. El algoritmo empleado trata de hacer mínima una función de coste que se expresa en dos términos que dependen del tiempo empleado en bombear el programa. La metodología propuesta es de carácter iterativo: partiendo del estado inicial, en cada iteración se obtiene una manera presumiblemente buena para llegar a un determinado instante habiendo vertido un determinado volumen. A lo largo del procedimiento se introducen reglas de carácter heurístico que agilizan la búsqueda pero que no permiten tener la certeza de alcanzar el óptimo. La metodología ha sido aplicada con éxito en algunos oleoductos en España.

De la Cruz et al. (2003) proponen el problema más complejo desde el punto de vista de la topología que se ha encontrado en la literatura. El oleoducto está formado por cabeceras (orígenes, según su nomenclatura), terminales (sumideros) e instalaciones de almacenamiento intermedias, unidas por tramos de diferente capacidad, algunos de los cuales pueden transportar productos en ambos sentidos.

Los autores proponen un algoritmo genético con una función multiobjetivo. Para definir la representación de la solución, es necesario, previamente, definir un horizonte temporal. La representación de cada solución consiste en un conjunto de valores para cada instante y para cada tramo, que indica el producto que se vierte desde el nodo correspondiente al tramo del que se trate. Existen tres objetivos: minimizar el número de transiciones de los productos que se envían desde cada tubería, minimizar el tiempo que se tarda en entregar los productos demandados por cada terminal y minimizar la suma de todos estos tiempos.

Además existen restricciones relativas a la producción de las cabeceras, a la existencia de colisiones, a las capacidades de los tanques, a las fechas de entrega. Algunas de estas

restricciones penalizan el valor de la función objetivo y otras exigen reparar la solución para que represente un programa.

En el ejemplo de aplicación que los autores muestran consta de ocho nodos (tres cabeceras, cuatro terminales y cinco instalaciones de almacenamiento intermedio), veinte tramos no reversibles y uno reversible. No es posible evaluar la potencia de esta técnica ya que los autores no señalan ni el tiempo de computación para obtener una solución suficientemente buena ni el horizonte temporal considerado.

De la Cruz et al. (2004) amplían el trabajo realizado por De la Cruz et al (2003). En primer lugar, plantean un modelo de programación lineal entera mixta (linealizando previamente algunas restricciones no lineales) para resolver el mismo problema y, además, un método híbrido consistente en emplear el modelo de programación lineal como generador de soluciones para el algoritmo genético. El problema que tratan para comparar los tres métodos es de dimensión relativamente reducida (once nodos y siete arcos). El horizonte temporal considerado es de 65 horas.

Por último, conviene notar que todos los estudios que se han encontrado asumen la hipótesis de caudal constante. Es decir, independientemente de los productos que se encuentren en las tuberías del oleoducto o de la configuración de equipos de bombeo, el caudal permanece constante. En determinados contextos esta hipótesis puede ser perfectamente admisible, sin embargo, en otros es muy poco realista

5. Conclusiones

Se han presentado las investigaciones más relevantes relativas a problema de programación de oleoductos destinados al transporte de hidrocarburos. Existe una gama relativamente amplia de enfoques, que se diferencian básicamente por la naturaleza de las técnicas empleadas y por el tipo de simplificaciones que se asumen para tratar el problema. El problema de programación de oleoductos aún ofrece posibles líneas de avance, consistentes en eliminar las hipótesis introducidas para simplificar el problema, de manera que los modelos representen mejor los problemas de programación de los oleoductos existentes.

Referencias

- Ashour, S. y Pai, N. (1973). An algorithmic approach for scheduling a multi-product pipeline system. *International Journal of System Science* Vol.4, nº2 149-166.
- Calfaro, D. C. y Cerdá, J. (2003). A Continuous-Time Approach to Multiproduct Pipeline Scheduling. *Computer-Aided Chemical Engineering* 65-73.
- Cafaro, D. C. y Cerdá, J. (2004). Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 28, 2053-2068.
- Camacho, E. F., Ridao M. A., Ternero J. A., Rodríguez J. M. (1990). Optimal Operation of Pipeline Transportation Systems. *Control of Transportation Systems*. Vol.5, 455-460.
- Camponogara, E y De Souza, P.S. (1996). A-Teams for Oil Transportation Problem through Pipelines. Information Systems Analysis and Synthesis. *Proceedings of the International Conference of Information Systems Analysis and Synthesis*. Orlando, 718-725
- De Felice, C. A. (1975) A Discrete Deterministic Pipeline Flow Simulation With Online Scheduler Interface to Solve Dynamic Batch Scheduling Problems. *Winter Computer Simulation Conference*.

- De la Cruz, J. M., De Andrés-Toro, B., Herrán, A., Porta, E. B., Blanco, P. F. (2003). Multiobjective Optimization of the Transport in Oil Pipelines Networks. *Proceedings of the 2003 Emerging Technologies and Factory Automation*. 566-573.
- De la Cruz, J. M., Martín, J. L. R., González, A. H., Fernández, P. (2004). Hybrid Heuristic Mathematical Programming in Oil Pipelines Networks. *Evolutionary Computation*. Vol. 2, 1479-1486.
- Escudero, L. F. et al. (1999). CORO, a modelling and an algorithmic framework for oil supply transformation and distribution optimization under uncertainty. *European Journal of Operational Research*. Vol.114, 638-656.
- Flukinger, T. E. y Smith R (1969). Liquid Pipeline Scheduling and Control with an On-Line Multiprogrammer Process Computer. *IEEE Transactions on Industry and General Applications* Vol IGA-5, nº 4, 389-402.
- Hane, C. A. y Ratliff H. D. (1993). Sequencing inputs to multi-commodity pipelines. *Annals of Operations Research*. Vol. 57, 77-109
- Magatao, L., Arruda, L.V., Neves F. Jr. (2004). A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 28, 171-185.
- Milidú, R. L., Pessoa, A. A., Laber, E. S. (2002). Pipeline Transportation of Petroleum with No Due Dates. *Proceedings of the Latin 2002*. 248-262.
- Pinto, J. M. e Grossman, I. E. (1998). Assignment and Sequencing Models for the Scheduling of Process Systems. *Annals of Operations Research*. Vol. 81, 433-466.
- Rejowski. R. and Pinto, J. M. (2003). Scheduling of a Multiproduct Pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*. Vol.27, 1229-1246.
- Rejowski. R. and Pinto, J. M. (2004). Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 28, 1511-1528.
- Sasikumar, M. (1997). PIPES: A heuristic Search Model for Pipeline Schedule Generation. *Knowledge Based Systems*. Vol. 10, 169-175.
- Sparrow, D. J. (1986). Computer Aided Scheduling of Multiproduct Oil Pipe Lines. Computer Assisted Decision Making. *Actas del seminario UNICORN*, Amsterdam, 243-251.