

Diseño modular en Witness para la programación de oleoductos

Álvaro García Sánchez¹, Jorge Guillén García², Miguel Ortega Mier³

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

²Compañía Logística de Hidrocarburos (CLH). C/ Méndez Álvaro, 44. 28045, Madrid. jguilleng@clh.es

³Unidad 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 uno de los medios más utilizados, debido a que es la opción que ofrece costes más reducidos a partir de un volumen crítico y hasta cierta distancia, y un funcionamiento más seguro. A lo largo de la vida de un oleoducto se plantean problemas con diferente carácter: desde las decisiones estratégicas de su diseño hasta las más operativas relativas a su operación diaria. El carácter del trabajo que se presenta a continuación se enmarca dentro del ámbito táctico y tiene por objeto facilitar la programación mensual de oleoductos para el transporte de hidrocarburos. La tarea de programación consiste en la determinación de la secuencia de envíos que se debe realizar desde cada origen, especificando qué volúmenes se envían, de qué productos, cómo se realiza el reparto aguas abajo y cuál es caudal (dentro de los admisibles) con el que se transportan los productos. Para facilitar la tarea de programación se ha desarrollado una serie de módulos en Witness junto con un programa en Visual Basic que permiten simular el comportamiento de oleoductos que cumplen unas determinadas características.

Palabras clave: programación, simulación, Witness, oleoductos.

1. Introducción

El transporte de hidrocarburos por oleoducto es un medio muy utilizado debido a los reducidos costes que entraña y a la seguridad que ofrece. El carácter de las decisiones relativas a un oleoducto abarca desde las estratégicas a las más operativas. La presente comunicación se centra en una decisión de carácter táctico: la programación mensual del envío de productos por un conjunto de oleoductos. En la presente comunicación se describen las principales características de los módulos desarrollados en Witness para facilitar la tarea de programación.

En el siguiente epígrafe, se comentan las características de los oleoductos que pueden ser representados con el conjunto de módulos disponibles, así como los datos de partida para caracterizar un problema y la definición precisa de un programa. En el epígrafe 3 se describe la estructura de la herramienta, comentando con cierto detalle los elementos de los que consta así como los resultados que permite obtener. En el epígrafe 4 se presenta un ejemplo de aplicación. Finalmente, se presentan las conclusiones más notables así como las posibles extensiones de trabajo realizado hasta el momento.

2. Caracterización de oleoductos y definición un programa

El conjunto de oleoductos que se pueden modelar de forma sencilla con la herramienta deben presentar un conjunto de características relativas a la topología y a la dimensión del mismo.

Desde el punto de vista topológico, se admiten ramificaciones, pero no ciclos. Pueden existir diferentes orígenes desde los cuales se pueden lanzar paquetes a una o a varias tuberías. Un terminal puede recibir paquetes de varias tuberías diferentes. Los tramos tienen un sentido único de flujo.

Con respecto a la dimensión del oleoducto, no existe ninguna restricción con respecto al número de nodos que pueden formar la red. Sí se ha limitado el número de productos a un máximo de siete. Esta limitación permite representar perfectamente los problemas en el sistema español. Con cierto trabajo adicional se podría incrementar el número de productos que pueden transitar por el oleoducto.

Con respecto al caudal, se pueden representar de forma inmediata oleoductos con caudal constante. Sin embargo, esta hipótesis puede no ser en absoluto aceptable en algunos casos. Introduciendo unas líneas de código es posible hacer que el caudal dependa del contenido del oleoducto. Con el código anterior, que no se introduce consideraciones de tipo fluido-dinámicas, la precisión es suficiente para la tarea de programación mensual.

Para definir de forma precisa la configuración de un oleoducto en particular es necesario disponer de los siguientes datos:

- Horizonte temporal de programación. Típicamente se trata de un mes, pero en determinadas circunstancias puede resultar interesante estudiar un periodo más amplio.
- Capacidades de todos los tanques en los diferentes terminales así como el nivel de existencias al comienzo del horizonte de programación.
- Capacidades de las tuberías y sentido del flujo a lo largo de las mismas, así como el contenido inicial de cada tubería al comienzo del horizonte de programación...
- Cantidades de cada producto que se deben enviar desde cada origen a cada destino. Este es un dato de partida que recibe el responsable de la programación del oleoducto.
- Datos relativos a la demanda en las terminales donde se retiran productos. La demanda total del periodo para cada terminal y para cada producto se considera igual al programa de envíos descrito en el punto anterior. Pero como la pauta de consumo no es homogénea, también se introduce el patrón semanal de retirada del producto a lo largo del horizonte.
- Caudales en cabecera dependiente del contenido del oleoducto. El caudal depende de los productos que existen en determinados puntos del oleoducto. Además, existe la posibilidad de añadir lo que se conoce como mejorador de flujo, que permite aumentar el caudal en el oleoducto. Se han considerado tres diferentes configuraciones de bombeo (combinación de utilización de grupos de bombeo con nivel de inyección de mejorador de flujo). Es necesario establecer los caudales que se alcanzan para cada configuración.

La definición de un programa consiste en la definición de una secuencia de paquetes para cada estación de bombeo situados en las cabeceras. Cada paquete queda definido con el producto, el volumen, la configuración de bombeo y la fracción que se dirige a cada terminal aguas abajo.

Pero en ocasiones, en cabecera existen relativamente próximas a una refinería, un conjunto de tanques de almacenamiento con la que están conectadas mediante un conjunto de tuberías, de

tal forma que la refinería puede alimentar al oleoducto y a las instalaciones de almacenamiento y, a su vez, el oleoducto puede alimentarse bien de la instalación de almacenamiento o bien de la refinería. En este caso, para cada paquete del programa de cada estación de bombeo es necesario definir el origen del que se alimenta (refinería o instalación de almacenamiento) y además, es necesario indicar el programa de envíos por las tuberías que vierten desde la refinería a la instalación de almacenamiento

Como comentan Milidú et al. (2003) en problemas de características parecidas, se trata de un problema complejo y que no ha sido suficientemente tratado.

Actualmente, existen en el mercado paquetes informáticos que permiten simular el comportamiento de un oleoducto basándose en la Mecánica de Fluidos, como Stoner Pipeline Simulator (SPS) o Pipeline Studio (de Energy Solutions). Sin embargo, la precisión de los mismos exige incorporar una gran cantidad de datos. Además, es necesario ‘operarlos’, es decir, gestionarlos de forma análoga a como se gestiona el oleoducto en tiempo real, lo cual ofrece unos tiempos de simulación muy elevados. Estos simuladores pueden ser idóneos para entrenar a operadores de oleoductos, pero no lo son para programar las operaciones en un período suficientemente largo en un sistema logístico como el español.

Los motivos anteriores, por lo tanto, ponen de relieve el interés de disponer de herramientas de ayuda a la toma de decisiones como la que se presenta en esta comunicación.

3. Construcción de modelos

Para elaborar los módulos que permiten simular oleoductos se ha seleccionado como base el software comercial Witness. Este software ofrece dos ventajas fundamentales frente a cualquier otro lenguaje de programación de carácter general. En primer lugar, ofrece un gran número de elementos para representar el modelo y, en segundo, permite combinar dichos elementos de una relativa sencilla.

En particular, Witness incorpora un conjunto de elementos para representar fluidos que facilita enormemente la tarea. Igualmente, la posibilidad de disponer de una representación gráfica de la evolución del programa durante la ejecución es muy ventajosa (aunque no absolutamente necesario).

A pesar de que hasta el momento no se han incorporado fenómenos de carácter estocástico, que justificarían aún más el uso de Witness, se consideró necesario hacer uso de un entorno de programación para representar un problema complejo para el cual no resulta posible construir una función analítica que permita de forma sencilla evaluar la calidad de un programa.

Para facilitar la elaboración de modelos se han construido un conjunto de módulos que permiten representar diferentes elementos de un oleoducto. De esta manera, combinando adecuadamente los módulos es posible representar oleoductos que cumplan las características descritas más arriba. Además, una vez construido un modelo es posible introducir modificaciones de forma sencilla modificando sólo los módulos que lo requieran (pudiéndose reutilizar para posteriores modelos).

3.1. Estructura de la herramienta

La herramienta se construye mediante la utilización de Witness, Visual Basic y Excel.

El modelo de simulación se elabora en Witness partiendo de un archivo que sirve de base, al cual se añaden de forma progresiva los diferentes módulos. Los módulos incluyen código genérico que se ejecutará durante la ejecución del modelo independientemente de las particularidades de este.

La función de Visual Basic consiste en simplificar la tarea de configuración del modelo mediante la incorporación del resto del código que permite representar completamente el oleoducto. Visual Basic permite vincular de forma adecuada los módulos e introduce el código correspondiente a capacidades, demandas, etc. Excel permite importar datos de forma sencilla desde otras fuentes, desde las que lee Visual Basic (que a su vez permite configurar Witness).

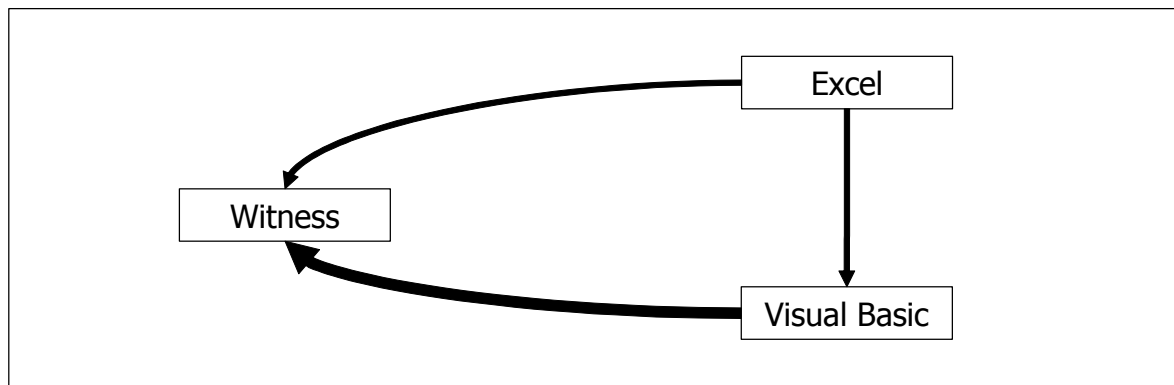


Figura1. Relación entre aplicaciones

3.2. Módulos de Witness

A continuación se enumeran los módulos disponibles y se describen algunas características de los mismos.

3.2.1. Módulo ‘General’

Básicamente, este módulo contiene las variables donde se guarda información relativa al tamaño del oleoducto, a los nodos que lo componen, sus tipos, las relaciones de precedencia entre ellos. Igualmente, almacena elementos para conectarse con Visual Basic y permitir su interacción.

3.2.2. Módulo ‘Llenado inicial’

Witness no permite representar de forma instantánea la situación correspondiente al instante inicial del horizonte de programación. Este módulo almacena la información relevante para gobernar el proceso por el cual el modelo llega a las condiciones iniciales, a partir de la cual se simula la operación del oleoducto. Durante el periodo de llenado inicial no se registra ningún tipo de información para evaluar la calidad del programa.

3.2.3. Módulo ‘Refinería’

Representan los nodos de la red que alimentan al oleoducto o a alguna instalación de almacenamiento adyacente, en caso de que esta exista. Las refinerías se representan como un conjunto de tanques de capacidad y volumen inicial suficientemente elevado como para poder servir producto en cualquier momento a lo largo de la simulación

3.2.4. Módulo ‘Instalación de almacenamiento’

Este módulo representa las instalaciones de almacenamiento que se sitúan en las cercanías de una refinería. Alimentan al oleoducto cuando el programa de la estación de bombeo asociada a la misma lo requiere. Igualmente, recibe producto de la refinería anexa cuando el programa lo indica. Y, por último, debe satisfacer las necesidades de los clientes de acuerdo con el perfil de retirada de cada uno de los productos.

3.2.5. Módulo ‘Terminal’

Representan las instalaciones a las que vierte el oleoducto y desde los cuales los clientes retiran productos. Existen dos variantes que permiten representar tanto terminales finales (no existen otras aguas abajo) o terminales intermedias (sí existen otras aguas abajo).

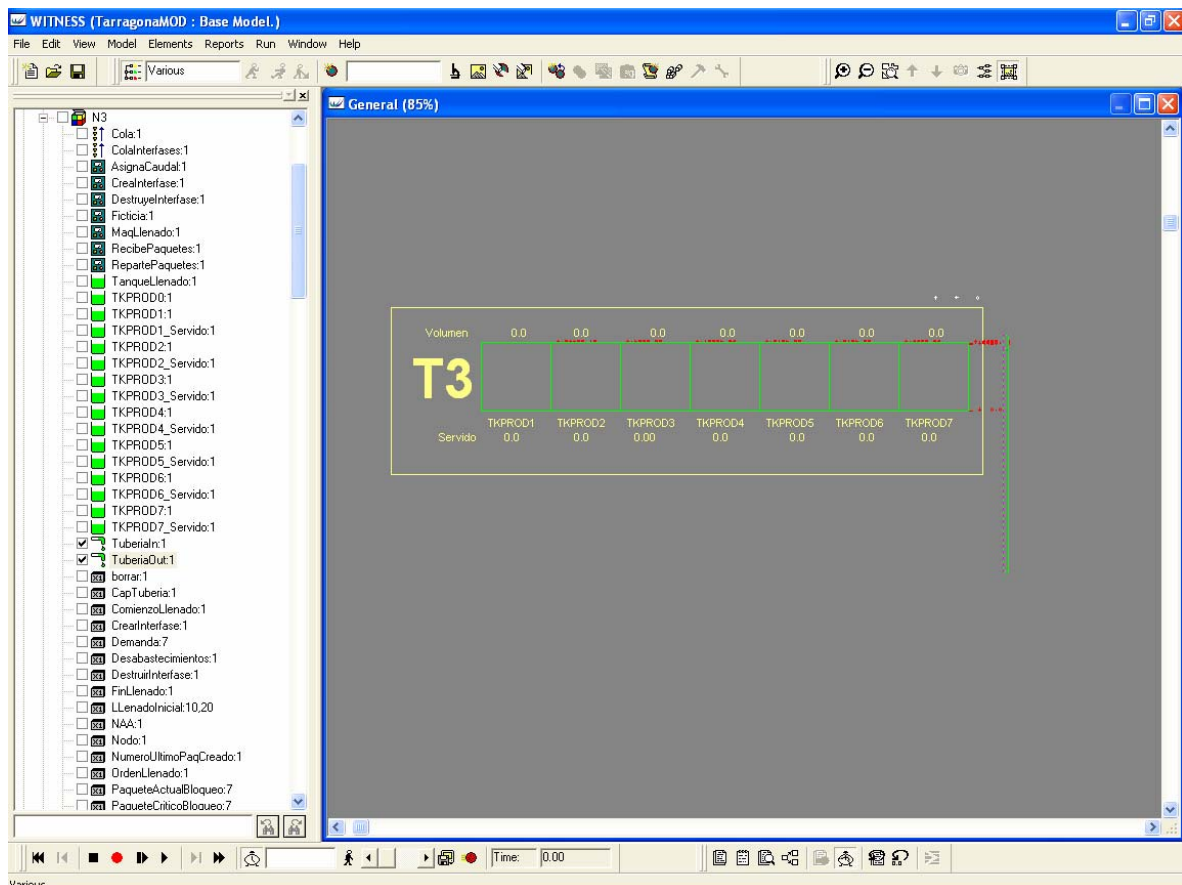


Figura2. Imagen de un módulo ‘Terminal’

3.2.6. Módulo ‘Ramificación’

Permiten representar ramificaciones en el oleoducto. En estos puntos el caudal se reparte entre dos o tres ramas (fácilmente, se podrían diseñar módulos con más ramas). Este módulo puede incorporar un conjunto de tanques para atender cierta demanda en este punto.

3.2.6. Módulo ‘Calendario’ y módulo ‘Estadísticas’

El módulo ‘Calendario’ permite controlar el avance del tiempo (días de la semana, del mes), que permite retirar en cada instante la cantidad adecuada de producto de acuerdo con el perfil semanal.

El módulo ‘Estadísticas’ permite registrar información relevante para el análisis de una solución. Al final de la ejecución crea un conjunto de archivos de los cuales lee Visual Basic.

3.3. Aplicación en Visual Basic y hoja de Excel

En primer lugar, la aplicación desarrollada en VB permite gobernar las funciones básicas de ejecución de Witness, es decir, desde Visual Basic es posible ejecutar el modelo en sus diferentes modos, su detención y su inicialización.

La función principal, sin embargo, consiste en introducir el código necesario que depende de las características particulares del oleoducto en cuestión (configuración del modelo) y en alimentar al módulo con los datos necesarios para ejecutar cada programa (inicialización del modelo).

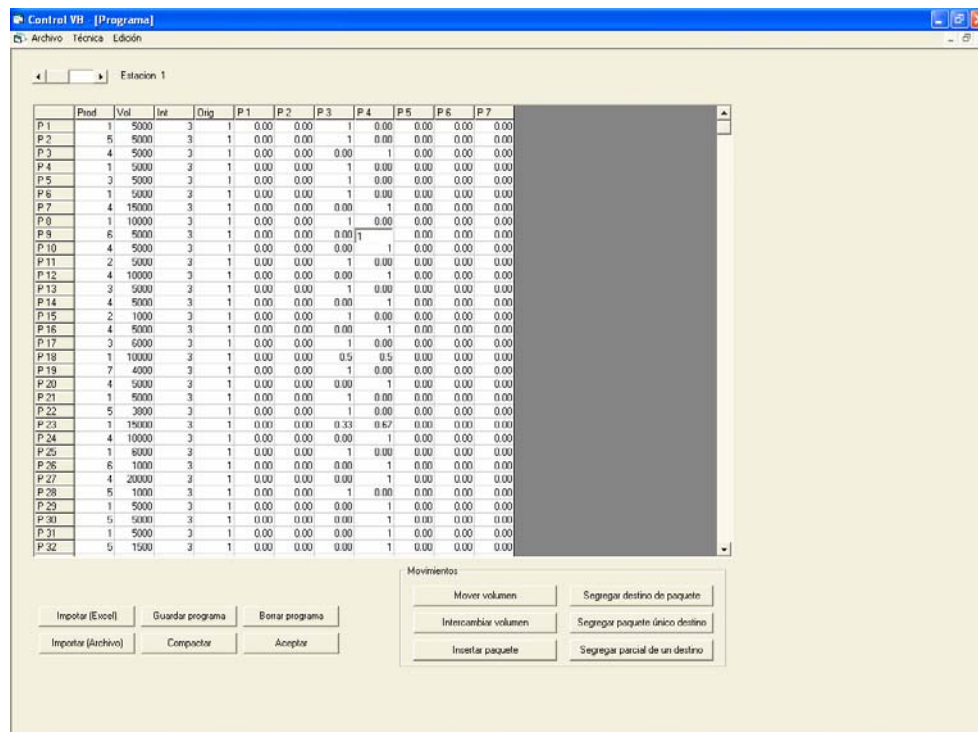


Figura 3. Pantalla Visual Basic. Programa de una estación de bombeo

En la configuración del modelo se dimensionan variables de Witness, se introduce código específico para cada elemento, capacidades, demanda, etc. Una vez ejecutada esta operación y

guardado el modelo de Witness no es necesario ejecutarla de nuevo. De esta forma, es posible realizar la configuración del modelo de forma rápida y sistemática, con garantías de no dejar nada de código sin introducir.

En la inicialización se vierte el programa a Witness. Aun cuando Witness permite la opción de tomar datos de Excel de forma rápida y sencilla, esta opción se ha diseñado con la idea de poder desarrollar más adelante una técnica de búsqueda automatizada y gobernada con Visual Basic. Visual Basic crea un conjunto de archivos de los que lee Witness con la información del programa que se desea simular.

Por último, el libro de Excel permite volcar datos a la aplicación de Visual Basic de forma simple. Esto tiene interés si el origen de los datos de los que se dispone se puede importar con sencillez a Excel.

3.4. Ejecución y análisis de soluciones

Al ejecutar el modelo desde Visual Basic se vuelca la inicialización en Witness y se deja transcurrir el tiempo correspondiente al horizonte considerado, al cabo del cual se dispone de la siguiente información:

- Volumen de demanda no satisfecha para cada terminal y para cada producto
- Volumen no entregado durante el horizonte temporal, que no coincide necesariamente con el volumen de demanda no satisfecha, ya que el volumen contenido en los tanques de cada terminal pueden permitir, por ejemplo, que no se deje de servir ninguna cantidad pero que no se lleguen a realizar todas las entregas previstas.
- En caso de que se produzca una rotura de stock, identificación del paquete que está alimentando el nodo en el que ocurre dicha rotura.
- En caso de que se produzca un bloqueo, debido a que el tanque que está recibiendo del oleoducto alcanza su volumen máximo, se registra el paquete que da lugar al bloqueo.
- Tiempo que permanecen en contacto cada dos productos a lo largo de todo el horizonte temporal. Esto permite disponer de información relevante sobre la calidad de la solución en lo que respecta a la formación de interfases.

La mezcla de algunos productos es poco deseable y la mezcla de otros es de todo punto inadmisibles. Por ejemplo, cuando un producto con bajo contenido en azufre y alto contenido en volátiles (como una gasolina) entra en contacto con otro de alto contenido en azufre y bajo contenido en volátiles (como un gasóleo de calefacción), la interfase de producto contaminado resultante se debe transportar a refinería para ser reprocesado, lo que implica unos costes desorbitados.

A pesar de que existen métodos para calcular el coste de las interfases más precisas, como primera aproximación al problema de las interfases se ha adoptado la simplificación más fina que las propuestas en la literatura para problemas similares Rejowski y Pinto (2003), Rejowski y Pinto (2004) y Cafaro y Cerdá (2003).

Por último, conviene hacer notar que la relación entre el tiempo de simulación y el tiempo real es del orden de 1:10000, lo que permite estudiar un amplio número de programas unos días antes del establecimiento del programa definitivo

4. Ejemplo de aplicación

A lo largo del desarrollo de los módulos se han diseñado diferentes oleoductos ficticios para verificar el correcto funcionamiento de la herramienta.

Además, por el momento, la herramienta ha permitido representar los dos oleoductos de CLH que parten de una refinería en Tarragona. Anexas a la refinería están ubicadas unas instalaciones de almacenamiento que se alimentan de la refinería mediante tuberías y que pueden alimentar al oleoducto. El oleoducto tiene una única refinería con dos estaciones de bombeo, que alimenta a dos ramas. Una primera rama se dirige a Lérida y a Zaragoza. La segunda se dirige a Palleja, donde se bifurca hacia Barcelona y Gerona.

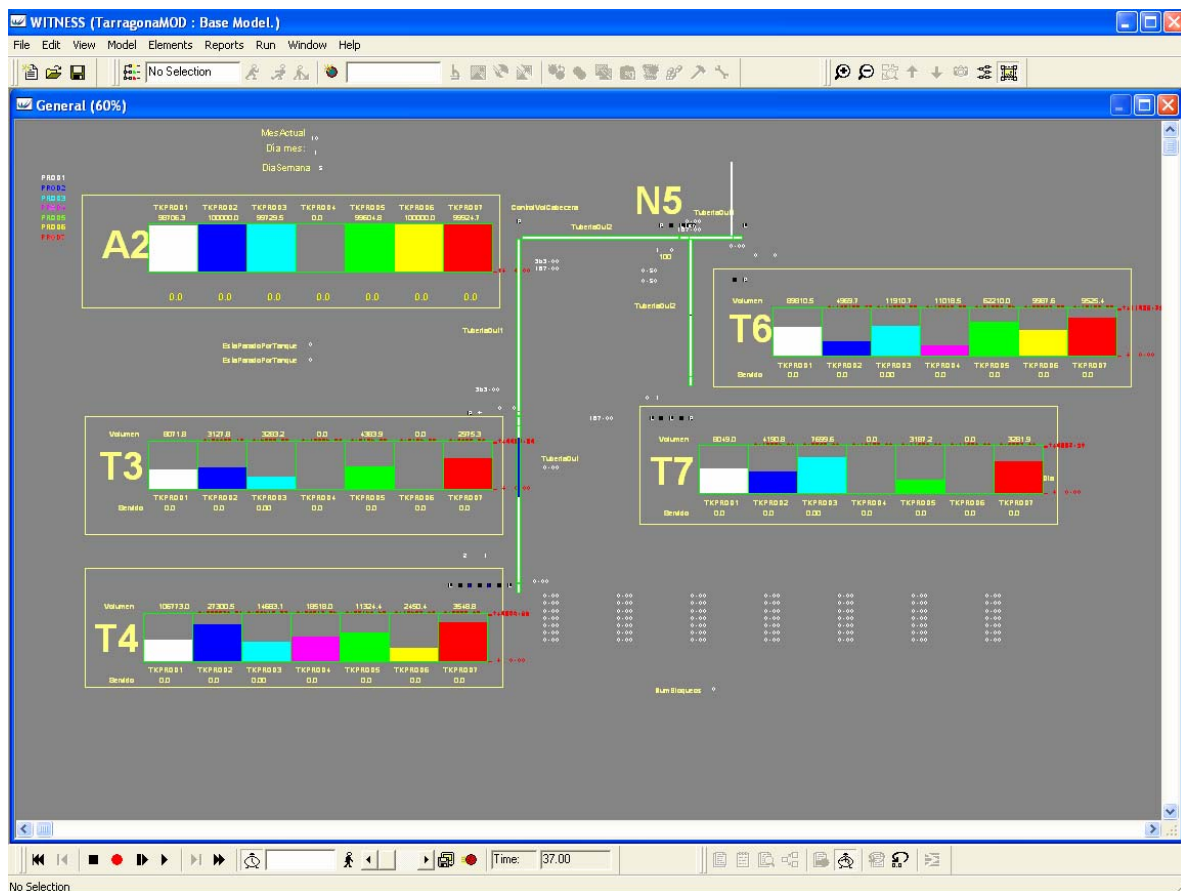


Figura4. Imagen de la simulación del oleoducto de Tarragona

El problema adquiere una mayor complejidad si se tiene en cuenta que tanto en Barcelona como en las instalaciones anexas a refinería se reciben descargas de buques, y que en Zaragoza confluyen otros dos oleoductos, uno que llega desde Bilbao, y otro que va hacia Madrid.

El establecimiento de una secuencia mensual para cada uno de los dos oleoductos que parten de Tarragona es una tarea demasiado compleja para ser llevada a cabo sin una herramienta de simulación que permita analizar un número de alternativas lo suficientemente grade. La precisión necesaria de la simulación no requiere el uso de cálculos hidráulicos, ya que la robustez de la solución en el horizonte mensual debe ser suficiente para cubrir incertidumbres como el error en la previsión de la demanda, los adelantos y retrasos de buques y las paradas imprevistas de grupos de bombeo u otros equipos.

El uso del modelo de simulación construido ha permitido realizar la programación mensual y analizar la robustez de las posibles soluciones.

5. Conclusiones

En la presente comunicación, se ha presentado un el trabajo desarrollado consistente en el diseño de un conjunto de módulos en Witness junto con una aplicación en Visual Basic que permiten:

- Construir de forma sencilla modelos definitivos sin necesidad de disponer de un profundo conocimiento de Witness
- Construir modelos que sirven de base a partir de los cuales se pueden construir otros más complejos, para lo cual es necesario conocer en mayor profundidad cómo programar en Witness.
- Evaluar, una vez el modelo está construido, aspectos relevantes de un determinado programa en un contexto de programación (demanda, llenado inicial, etc.) En la medida en la que el modelo es fiel a la realidad, no se necesitarán modificaciones mayores. En caso del que el modelo sea demasiado simple, es una programación de partida para los programadores.

Como trabajos futuros, a partir del trabajo realizado puede ser de gran interés continuar desarrollando la herramienta para automatizar el proceso de ejecución de solución y, posteriormente, poder desarrollar una técnica de búsqueda (de carácter metaheurístico, por ejemplo) de programas factibles y, además, suficientemente adecuados en términos de los efectos en la formación de interfases y de los costes asociados al empleo de mejorador de flujo y costes de energía de bombeo.

Por último, puede ser interesante generalizar los módulos existentes y desarrollar otros nuevos, que permitan representar configuraciones que en este momento no es posible modelar de forma inmediata. Por ejemplo, puede ser interesante simular el cruce de tuberías o tramos de tuberías reversibles.

Referencias

- Calvaro, D. C. y Cerdá, J. (2003). A Continuous-Time Approach to Multiproduct Pipeline Scheduling. *Computer-Aided Chemical Engineering* 65-73.
- Milidú, R. L., Pessoa, A. A., Laber, E. S. (2003). The complexity of makespan minimization for pipeline transportation. *Theoretical Computer Science*. Vol. 306, 339-351.
- 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.