

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE
OPERACIONES EN SISTEMAS DE
TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES
MÚLTIPLES A TRAVÉS DE
POLIDUCTOS**

Tesis presentada para optar al grado de
Doctor en Tecnología Química

por

Diego C. Cafaro

Director de Tesis: Dr. Jaime Cerdá

Santa Fe, 2009

A Ruth y Anita, mis soles,
a mis Padres, mis ejemplos,
y a la memoria de mi tío Eduardo,
el precursor

*“...Con el petróleo ocurre, como ocurre
con el café o con la carne, que los
países ricos ganan mucho más por
tomarse el trabajo de consumirlo, que
los países pobres por producirlo...”*

*Eduardo Galeano (1971)
“Las Venas Abiertas de América Latina”*

Agradecimientos

Agradezco a todos aquellos que de una u otra manera han colaborado en forma desinteresada con la realización de esta tesis.

Muy especialmente a mi director, el Dr. Jaime Cerdá, por sus invalorables aportes, su apoyo incondicional y su orientación permanente en el desarrollo de mis tareas.

A mi esposa, Ruth, por ser mi sustento, mi guía, mi compañía. Por su infinita paciencia y comprensión a lo largo de estos años.

A mis compañeros de trabajo, por las discusiones tan amenas como fructíferas.

A mis alumnos, por atender e interesarse en mis investigaciones.

A todos los que integran el Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC) y la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral, por brindarme el ámbito más propicio para realizar mis labores.

Y finalmente, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por el soporte económico ofrecido.

Prólogo

Esta tesis resume los resultados de años de estudio y desarrollo en el área de planeación operativa de sistemas de distribución de combustibles a través de poliductos. Estos medios de transporte, tan eficientes como confiables, constituyen un recurso estratégico clave para el abastecimiento de energía en las cadenas de suministro actuales. La impulsión secuencial de productos disímiles a través de un mismo conducto les confiere características únicas, que los diferencian de todos los medios de transporte convencionales. En particular, el problema de programar el movimiento de combustibles a través de poliductos es sorprendentemente complejo, y las metodologías propuestas en la literatura hasta el momento adolecen de serias falencias. La principal dificultad radica en la representación discreta de los dominios de tiempo y volumen, que conduce a modelos de gran tamaño, muy difíciles de resolver en tiempos computacionales acordes a las necesidades del proceso de programación de poliductos.

A partir de esos antecedentes, el desafío que se planteó fue obtener una representación eficiente del problema, basada en un enfoque continuo del tiempo y de la posición de los envíos dentro de los ductos. Comenzando por tuberías simples, que comunican un punto de aprovisionamiento con un único centro de recepción, hasta redes de poliductos interconectados, con múltiples refinерías, terminales de distribución, puertos y centros de consumo masivo dispersos sobre territorios extensos, los modelos presentados en este trabajo conforman una colección ordenada de propuestas continuas para el abordaje de la problemática. Todas ellas han sido plasmadas en modelos de programación matemática lineal mixta-entera (MILP), los cuales se describen capítulo por capítulo en orden de complejidad creciente. Asimismo, en el desarrollo de la tesis se han ido incorporando aspectos críticos del problema tales como el seguimiento de las interfases, la gestión detallada de operaciones de control y aprobación de lotes en las terminales de carga, la reprogramación del transporte sobre horizontes rodantes, la coordinación efectiva de las inyecciones teniendo en cuenta el plan de refino de las unidades productivas,

las limitaciones de capacidad de los tanques asignados, el funcionamiento de bombas en horas pico de demanda eléctrica, el manejo de estaciones de almacenamiento intermedio con propósito dual (recepción e inyección de combustibles), y la consolidación de envíos en lotes comunes de productos fungibles o estandarizados, entre otras. Por su parte, la optimización de los planes de transporte estuvo guiada por dos metas operativas elementales: minimizar los costos (de bombeo, degradación o reprocesamiento de interfases, mantenimiento de combustibles en inventario) y maximizar la utilización del recurso. En todos los casos, los criterios de evaluación se expresan en términos de la función objetivo del programa matemático.

Cabe destacar que gran parte de los resultados que se describen a lo largo de este trabajo han sido publicados en revistas científicas internacionales de alto impacto, como “*Computers & Chemical Engineering*”, o “*Industrial & Engineering Chemistry Research*”, y presentados en congresos reconocidos del área como el “*European Symposium on Computer Aided Process Engineering*” (ESCAPE) o el *Congreso Interamericano de Ingeniería Química*, entre los más destacados. Más aún, los últimos avances en la coordinación efectiva de redes de poliductos interconectados forman parte de un manuscrito recientemente enviado a publicación.

A lo largo de los capítulos se resuelven casos de estudio reales de la industria petrolera moderna, que demuestran claramente el potencial de las herramientas propuestas. La posibilidad de contemplar aspectos distintivos de las redes de poliductos, nunca antes abordados en forma rigurosa por los investigadores del área, ha permitido hallar soluciones eficientes a la operación del sistema de transporte por tuberías con el que cuenta nuestro propio país. Este hecho constituye un paso fundamental hacia el mejor aprovechamiento y la revalorización de estos recursos tan importantes para el desarrollo sustentable de la Nación.

Diego C. Cafaro

Contenido

Capítulo I. Sistemas de Transporte de Crudos y Derivados de Petróleo por Ductos	
I.1	Introducción 3
I.2	El Funcionamiento de los Poliductos 6
I.3	El Rol de los Poliductos en la Cadena de Suministro de los Combustibles 8
I.3.1	Operaciones “Upstream”: Recolección de Crudos 9
I.3.2	Operaciones “Midstream”: Abastecimiento de Crudos14
I.3.3	Operaciones “Downstream”: Refino y Distribución de Combustibles17
I.4	Resumen.....20
Capítulo II. Revisión Bibliográfica: Enfoques y Técnicas de Representación del Problema de Programación del Transporte por Poliductos	
II.1	Análisis Preliminar del Estado del Arte25
II.2	Caracterización del Problema.....26
II.3	Clasificación de los Modelos de Programación de Poliductos.....30
II.3.1	Clasificación de los Sistemas de Transporte por Poliductos31
II.3.2	Clasificación Metodológica de las Técnicas de Programación de Poliductos34
II.3.2.a	Procedimientos Heurísticos.....35
II.3.2.b	Programación Matemática39
II.4	Resumen.....49

Capítulo III. Planeación del Transporte por Poliductos con un Único Origen y un Único Destino

III.1	Introducción	53
III.2	Definición del Problema.....	55
III.3	Modelo de Representación	57
III.3.1	Consideraciones Generales.....	57
III.3.2	Hipótesis de Trabajo.....	58
III.3.3	Elementos Principales del Modelo.....	60
III.3.4	Restricciones Operativas	65
III.3.4.a	Conformación de Lotes	65
III.3.4.b	Períodos de Detención de la Línea.....	71
III.3.4.c	Seguimiento de los Envíos	73
III.3.4.d	Abastecimiento de Combustibles a la Estación Terminal.....	74
III.3.4.e	Satisfacción de las Demandas del Mercado	78
III.3.4.f	Control Diario de los Niveles de Inventario en la Terminal.....	82
III.3.5	Función Objetivo.....	84
III.4	Componentes Adicionales del Problema	85
III.4.1	Nuevas Consideraciones.....	86
III.4.2	Reformulación del Modelo	87
III.4.2.a	Ajuste del Tamaño de los Envíos.....	87
III.4.2.b	Tareas de Aprobación de Lotes.....	89
III.5	Caso de Estudio: Compañía CLC - Portugal	91
III.5.1	Ejemplo III.1	95
III.5.2	Ejemplo III.2	100
III.5.3	Ejemplo III.3	102
III.6	Resumen.....	106

Capítulo IV. Planeación del Transporte por Poliductos con un Único Origen y Múltiples Terminales de Recepción

IV.1	Introducción	111
IV.2	Caracterización del Nuevo Enfoque	116
IV.3	Definición del Problema	117
IV.4	Hipótesis de Trabajo	119
IV.5	Modelo de Representación	121
IV.5.1	Estructura Principal del Modelo	121
IV.5.1.a	Características de los Lotes Transportados	122
IV.5.1.b	Seguimiento de los Envíos y Despachos a las Terminales	123
IV.5.1.c	Stock de Combustibles en Depósitos y Nivel de Despachos al Mercado	125
IV.5.1.d	Programa de Producción en Refinería	126
IV.5.1.e	Condiciones Iniciales	126
IV.6	Formulación Matemática del Problema	126
IV.6.1	Restricciones de Definición de Lotes	126
IV.6.2	Seguimiento de los Envíos	133
IV.6.3	Gestión de Inventarios de Combustibles en los Depósitos	141
IV.6.4	Gestión del Programa de Producción en Refinería	145
IV.6.5	Condiciones de Partida	150
IV.6.6	Función Objetivo	151
IV.7	Actualización del Programa de Transporte por Tuberías	152
IV.7.1	Etapas de Inicialización	153
IV.7.2	Etapas de Actualización de Datos	156
IV.7.3	Etapas de Reprogramación	157
IV.7.4	Etapas de Ejecución de Despachos	158
IV.7.5	Rodado del Horizonte y Generación de una Nueva Instancia	159

IV.8 Implementación y Resultados	159
IV.8.1 Caso de Estudio: Poliducto São Paulo – Brasilia (Petrobrás, Brasil)	159
IV.8.2 Ejemplo IV.1: Programa de Refino Invariable	165
IV.8.3 Ejemplo IV.2: Programa de Refino Dinámico	174
IV.9 Conclusiones Preliminares	176

Capítulo V. Planeación del Transporte por Poliductos con Múltiples Puntos de Ingreso de Combustibles

V.1 Introducción	181
V.2 Contribuciones Previas	188
V.3 Elementos Principales del Modelo	190
V.3.1 Conjunto de Ejecuciones <i>K</i>	190
V.3.2 Conjunto de Lotes o “Batches” <i>I</i>	191
V.3.3 Conjunto de Terminales de Ingreso y Recepción de Combustibles	193
V.3.4 Conjunto de Combustibles o Productos Transportados	194
V.4 Variables de Decisión	194
V.5 Hipótesis del Modelo.....	195
V.6 Formulación Matemática del Problema	197
V.6.1 Restricciones.....	197
V.6.1.a Restricciones de Control de Ejecuciones	197
V.6.1.b Restricciones de Seguimiento de Lotes	199
V.6.1.c Condiciones de Conectividad entre Terminales y Lotes	202
V.6.1.d Restricciones de Aprovisionamiento y Demanda de Productos.....	206
V.6.2 Función Objetivo del Problema	209

V.7	Aplicación del Modelo a Distintas Variantes de un Caso de Estudio	211
V.7.1	Ejemplo V.1: Operación del Sistema en Modo Segregado...	215
V.7.2	Ejemplo V.2: Operación del Sistema en Modo Fungible	220
V.7.3	Ejemplo V.3: Programación de Poliductos en Horizontes Extendidos.....	225
V.8	Conclusiones Preliminares	227

Capítulo VI. Planeación del Transporte de Combustibles en Redes de Poliductos Coordinados

VI.1	Introducción	233
VI.2	Ejemplo Motivante.....	237
VI.3	Hipótesis del Modelo.....	241
VI.4	Formulación Matemática	242
VI.4.1	Restricciones para el Ordenamiento de las Corridas de Bombeo	243
VI.4.1.a	Secuenciación de Bloques de Corridas Paralelas	243
VI.4.1.b	Asignación de Lotes a Corridas de Bombeo Individuales.....	245
VI.4.1.c	Dimensionamiento de las Inyecciones	246
VI.4.1.d	Duración de los Bloques de Corridas de Bombeo.....	246
VI.4.2	Restricciones para el Seguimiento de Lotes.....	247
VI.4.2.a	Evolución del Tamaño de los Envíos en el Tiempo	247
VI.4.2.b	Seguimiento de los Ubicación de los Lotes en el Tiempo	248
VI.4.3	Ecuaciones de Balance Global Alrededor de la Red de Poliductos	249
VI.4.4	Condiciones de Viabilidad para la Inyección y el Despacho de Lotes	250
VI.4.4.a	Inyección de Combustibles en los Poliductos.....	250

VI.4.4.b Derivación de Material hacia los Centros de Recepción.....	251
VI.4.5 Condiciones de Corridas de Bombeo Compatibles	253
VI.4.6 Restricciones de Aprovisionamiento y Demanda de Combustibles	256
VI.4.6.a Asignación de Productos a “Batches”	256
VI.4.6.b Cantidad de Producto p Inyectado desde un Nodo-Fuente	257
VI.4.6.c Volumen de Combustible p Derivado a Tanques de un Depósito.....	257
VI.4.6.d Disponibilidad de Combustibles en cada Nodo-Fuente	257
VI.4.6.e Satisfacción de las Demandas de Combustibles en cada Destino	258
VI.4.7 Condiciones Iniciales.....	258
VI.4.8 Función Objetivo.....	259
VI.5 Resultados y Discusión	260
VI.5.1 Ejemplo VI.1: Minimización del “Makespan”	260
VI.5.2 Ejemplo VI.2: Red de Poliductos Argentinos.....	268
VI.6 Consideraciones Finales	279

Capítulo VII. Conclusiones Finales y Trabajos Futuros

VII.1 Conclusiones Generales	285
VII.2 Alcances de los Modelos Propuestos	286
VII.2.1 Operación de Poliductos con Origen y Destino Únicos	286
VII.2.2 Operación de Poliductos con Origen Único y Destinos Múltiples	287
VII.2.3 Operación de Poliductos con Múltiples Fuentes y Destinos.....	289
VII.2.4 Operación de Redes de Poliductos Interconectados.....	291
VII.3 Nuevos Desafíos en la Programación de Poliductos	293

VII.4 Áreas de Desarrollo Futuro.....	294
---------------------------------------	-----

Anexos

Anexo I. Modelo de Programación de Poliductos con un Único Origen y un Único Destino.....	303
Anexo II. Modelo de Programación de Poliductos con un Único Origen y Múltiples Terminales de Recepción ...	307
Anexo III. Modelo de Programación de Poliductos con Múltiples Puntos de Ingreso de Combustibles.....	311
Anexo IV. Modelo de Programación de Redes de Poliductos Interconectados.....	315
Nomenclatura.....	319
Bibliografía	325

Capítulo I

Sistemas de Transporte de Crudos y Derivados de Petróleo por Ductos

I.1 Introducción

En mercados globales altamente competitivos, la presión ejercida sobre las organizaciones para encontrar nuevas formas de crear y distribuir valor entre los clientes es cada vez mayor. Existe un amplio reconocimiento que a través de la gestión efectiva de la cadena de suministros se podrán alcanzar simultáneamente las metas de reducción de costo y mejoramiento del servicio al cliente. En ese contexto, la planeación de las actividades logísticas ha cobrado gran importancia en los últimos años, especialmente en firmas dedicadas a la producción y comercialización de bienes de alta demanda, que cuentan con una amplia red de distribución, como es el caso de las empresas del sector petrolero y petroquímico.

La programación de operaciones de provisión, refino, almacenamiento y transporte de productos derivados del petróleo es una tarea sumamente compleja e indispensable para lograr una adecuada coordinación entre los eslabones de la cadena de suministro de combustibles. Desde las materias primas, crudos o variedades de petróleo obtenidos en vastas regiones del planeta, hasta los combustibles refinados y sus distintos grados de calidad, los productos de esta sofisticada cadena de valor recorren miles de kilómetros partiendo de su origen hasta alcanzar su destino final.

Existen diversos medios de transporte involucrados, entre los que se cuentan: grandes buques de carga (transporte marítimo), barcazas (transporte fluvial), trenes y camiones (transporte terrestre), y tuberías o ductos de diferentes dimensiones (ver Figura I.1). Los ductos específicamente poseen características distintivas en su funcionamiento que los diferencian del resto de los medios de transporte convencionales. Los barcos, los trenes, los camiones, constituyen unidades móviles que se trasladan desde origen a destino, dentro de las cuales las mercaderías permanecen estáticas. Por el contrario, los ductos son unidades estáticas que conectan origen y destino, y a través de las cuales se movilizan los productos o envíos.

Comúnmente, el petróleo crudo y los productos refinados se transportan en conductos separados. Por un lado, los **oleoductos** transportan diferentes tipos de crudo desde puertos o centros de extracción hacia las unidades de refino, donde se combinan para obtener los combustibles que demanda el mercado. Por el otro, los **poliductos** o ductos multi-producto son capaces de transportar grandes volúmenes de diversos tipos de productos refinados o grados del mismo producto, desde las fuentes de abastecimiento

tales como refinerías o terminales de carga, hacia los centros de distribución, donde se almacenan temporalmente antes de ser despachados a los mercados de consumo. Si bien ambos sistemas forman parte de dos instancias distintas en la cadena de suministro, su modo de operación es similar. Ambos manejan una variedad de especies que deben ser secuenciadas e impulsadas de la forma más eficiente posible, para atender los requerimientos de todos los destinos a partir de la disponibilidad de cada una de las fuentes. En su desarrollo, esta tesis se referirá particularmente a la problemática de los poliductos de transporte de combustibles, aunque tal como se ha explicado, el análisis puede extenderse fácilmente al aprovisionamiento de crudos a través de oleoductos.



Figura I.1. Fotografía del “Trans Alaska Pipeline System – TAPS” (EE.UU.)

Los poliductos movilizan una amplia gama de destilados tales como naftas de distintos grados, combustibles de aviación, gas oil, gases licuados de calefacción y kerosene doméstico, para las principales compañías petroleras del mundo. Una medida de la importancia de los ductos es el hecho que cerca de dos tercios de todos los productos derivados de petróleo en los Estados Unidos se transportan a través de ellos. Representan el medio más confiable, económico y seguro para transportar grandes volúmenes de material a lo largo de extensas distancias.

Un poliducto típico de 20” de diámetro (50,8 cm) y 800 km de longitud es capaz de transportar 900 m³ por hora de combustibles. Teniendo en cuenta que un camión cisterna dispone de una capacidad aproximada de 30 m³, es necesario despachar un vehículo cada 2 minutos para igualar el caudal de transporte del conducto (720 despachos por día). Más aún, si se estima que

cada camión recorre un promedio de 800 km por día, y considerando que debe retornar vacío a la estación de carga, se requiere de una flota de 1440 unidades para igualar su desempeño. Estos cálculos sencillos dan idea de la eficiencia de las tuberías como medios de transporte de combustibles.

Sin embargo, la programación de las operaciones de un poliducto es una tarea sumamente compleja, con un gran volumen de información y muchas restricciones a tener en cuenta. Los programas de producción de las refinerías usuarias del poliducto, las demandas de productos en cada centro de distribución, así como las restricciones operacionales que prohíben bombear sucesivamente determinados derivados del petróleo debido a problemas de contaminación por mezclado, todos deben considerarse al elaborar el plan de bombeo del poliducto. Más aún, la tarea de programación debe contemplar los inventarios disponibles en los tanques situados en las terminales de origen y de destino, así como los inventarios en tránsito que se desplazan por el interior de la tubería.

Las decisiones principales asociadas a este problema son: qué productos se deben transportar y en qué cantidades, cuáles son los tiempos exactos de inicio y finalización de cada corrida de bombeo, y cómo distribuir los enormes lotes de combustibles que se inyectan en el interior del ducto entre las distintas terminales del sistema.

Como ya se indicara, el poliducto es, sin lugar a dudas, la opción más conveniente para trasladar y monitorear los enormes volúmenes diarios de combustible que demanda el funcionamiento de los sistemas domésticos y productivos actuales. No obstante, requiere de una inversión inicial de capital muy elevada, que obliga a las empresas operadoras a utilizar las tuberías al tope de su capacidad, para amortizar rápidamente el recurso comprometido.

El gran desafío que enfrentan hoy las principales compañías productoras y distribuidoras de combustibles del mundo, es lograr una coordinación óptima entre los distintos componentes de la cadena de suministro, de tal forma de maximizar la utilización de estas líneas de transporte, reduciendo el uso de medios alternativos menos convenientes. Sin embargo, dada la alta complejidad que reviste el problema de programación de las operaciones en redes de poliductos, no se cuenta actualmente con herramientas prácticas que determinen la forma más eficiente de manejar estos medios de transporte más económicos.

I.2 El Funcionamiento de los Poliductos

Componentes Principales

Un poliducto simple puede comunicar numerosas fuentes con destinos distantes. Para operar con normalidad, estas tuberías de sección circular deben permanecer completamente llenas de producto en todo momento. Los combustibles líquidos fluyen dentro de ellas propulsados por bombas centrífugas que aportan la energía necesaria para contrarrestar diferencias de nivel y pérdidas de carga por fricción a lo largo del trayecto. En general, estas unidades de bombeo son impulsadas con motores eléctricos o turbinas de gas, según la conveniencia y disponibilidad del insumo energético. Las estaciones de bombeo se separan entre 30 y 200 km, de acuerdo a la topografía del tendido y la capacidad de transporte requerida. El mapa de la Figura I.2 ilustra los distintos ductos que la empresa Repsol-YPF opera en la Argentina, así como las estaciones de bombeo dispuestas a lo largo de cada trayecto. Dos oleoductos que arrancan en Puerto Rosales (Bs. As.) y Puesto Hernández (Neuquén) abastecen las refinерías de La Plata (Bs. As.) y Luján de Cuyo (Mendoza) respectivamente, desde donde se distribuyen los combustibles refinados por poliductos a los mercados de consumo.

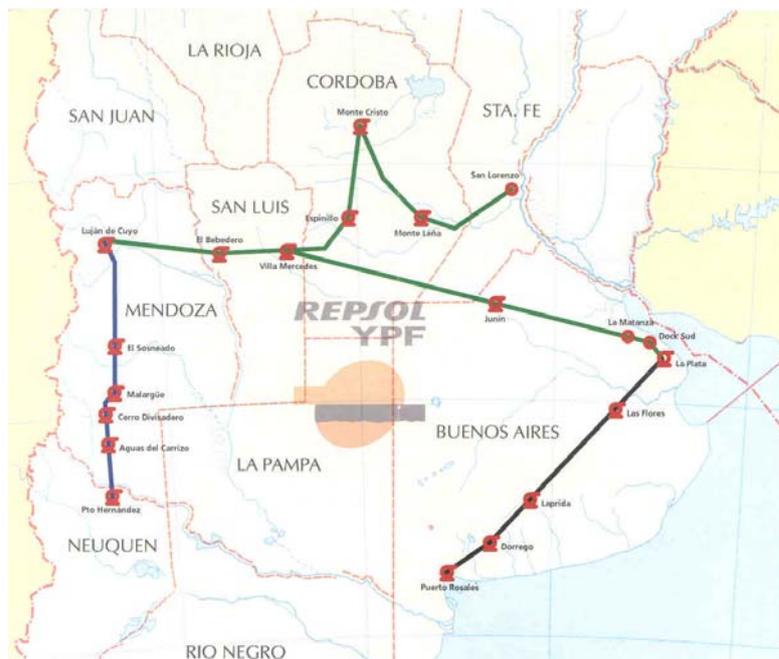


Figura I.2. Instalaciones Ductoviarias de Repsol-YPF en Argentina

En cada línea de transporte, los productos se direccionan hacia los destinos mediante el accionamiento de válvulas de grandes dimensiones, que permiten no sólo controlar los caudales de material que arriban a los centros de distribución, sino también ordenar los lotes o envíos de combustible que parten desde cada una de las fuentes. Los sistemas de transporte por tuberías suelen disponer además de tanques de almacenamiento temporal, tanto en los nodos de origen como en las terminales de distribución, donde se depositan los envíos de combustible movilizados a través del poliducto.

Disposición de envíos

Los combustibles refinados y sus grados se bombean uno detrás de otro dentro del mismo conducto conformando unidades perfectamente identificables a las que se denomina “batches”. Un “batch” o lote de combustible es una corriente uniforme que contiene cierto volumen de un único producto. Generalmente, no se utilizan dispositivos físicos para la separación de “batches”, y la contaminación de productos en cada interfase es inevitable. La operación del ducto en régimen turbulento aplanan el perfil de velocidades y reduce los niveles de contaminación, tendiendo al “flujo pistón” ideal. Sin embargo, cuando la diferencia de densidad entre los fluidos es suficientemente grande, deben utilizarse separadores mecánicos denominados “pigs”, que evitan el flujo de un material por debajo del otro, en el efecto que comúnmente se da en llamar “cuña”. Este fenómeno es más común en la operatoria de oleoductos.

Interfases

El material de interfase que resulta del bombeo de distintos grados del mismo producto, tales como nafta común y súper, se agrega al “batch” de producto de menor grado. Esta degradación del producto, reduce el volumen relativo del “batch” de mayor calidad. Por otra parte, la interfase entre dos productos distintos como nafta y gas oil, genera una mezcla denominada “transmix”. En este caso, el “transmix” se aparta y se envía a tanques de segregación. Posteriormente se lo reprocesa en refinerías de gran escala o plantas de propósito especial.

El volumen real de producto-mezcla depende de algunos parámetros físicos tales como el diámetro del ducto, la distancia recorrida, la topografía, la velocidad y la viscosidad de los productos puestos en contacto. De cualquier modo, el volumen de la mezcla generada al impulsar “batches” sucesivos de

dos productos diferentes en el sistema se aproxima, generalmente, a un valor fijo que es independiente del tamaño de cada “batch”. Como referencia, un “batch” de tamaño característico igual a 5000 m³ de producto ocupa cerca de 100 km en un ducto de 10” de diámetro. Típicamente, en una tubería de esas dimensiones, se genera una mezcla o “transmix” del orden de 24 m³, cuando el “batch” recorre un total de 200 km. Este volumen representa un porcentaje inferior al 0,50% del contenido original del lote.

Modos de Operación

Las compañías dedicadas al transporte de combustibles por ductos definen dos modos de operación diferenciados: (1) el modo “fungible” o consolidado, y (2) el modo segregado. Los combustibles de tipo “fungible” son productos genéricos, cuyas especificaciones técnicas se definen de antemano por el operador del poliducto. Esto permite consolidar envíos de diferentes fuentes en un mismo “batch”, que luego se secciona para atender los requerimientos de cada centro receptor (“splitting”). De este modo, los usuarios de la línea reciben un producto equivalente, pero no necesariamente el mismo producto que inyectaron. Esta estrategia reduce sensiblemente los costos de interfases y flexibiliza los programas de operación, facilitando el cumplimiento de los tiempos de entrega de cada lote. Los combustibles convencionales (naftas y gasoil) suelen transportarse en modo “fungible”. En modo segregado, en cambio, los productos no son intercambiables. En este caso, cada refinería inyecta un producto específico, que debe llegar rigurosamente al destino establecido por el usuario.

I.3 El Rol de los Poliductos en la Cadena de Suministro de los Combustibles

La cadena de suministro de combustibles, también conocida como “Petroleum Supply Chain (PSC)”, es una extensa red de nodos, cada uno de los cuales involucra una o diversas fases en el proceso de extracción, elaboración y distribución de los productos. Asimismo, los distintos centros de operación interactúan entre sí intercambiando materias primas o productos elaborados, e información vinculada con este proceso.

El esquema de la Figura I.3 representa en forma simplificada una cadena típica de suministro de combustibles. En general, pueden distinguirse tres actividades principales dentro de la red: Obtención de Crudos, Refino y Distribución de Productos.

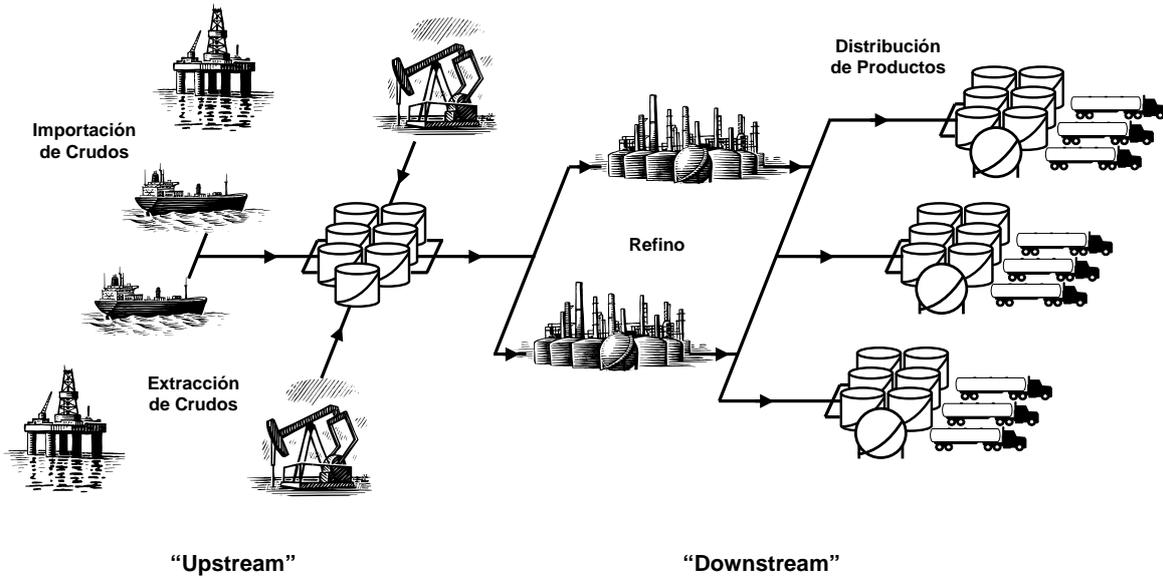


Figura I.3. Cadena de Suministro de Combustibles Típica

Paralelamente, la industria de los combustibles se divide en tres sectores, comúnmente conocidos como "upstream", "midstream" y "downstream", aunque las operaciones "midstream" tienden a incluirse en la categoría "downstream". El sector "upstream" comprende las actividades de exploración y explotación de pozos, así como el flujo de crudos y gas natural hacia las terminales primarias. Las operaciones "midstream" se relacionan a la adecuación, transporte y almacenamiento de crudos, gas natural (NG) y gases licuados de petróleo (NGL), mientras que el sector "downstream" involucra el procesamiento y la distribución de productos refinados, y sus canales de comercialización.

En las secciones subsiguientes se analizará en detalle cada uno de los sectores que conforman la cadena de suministro del petróleo, y el rol preponderante que juegan los poliductos como medios de transporte dentro y entre cada uno de estos bloques.

I.3.1 Operaciones "Upstream": Recolección de Crudos

La obtención de crudos constituye el eslabón inicial en la cadena de suministros. Los diversos crudos o variedades de petróleo, con diferentes propiedades físicas tales como densidad, viscosidad y composición, se extraen de pozos esparcidos en vastas regiones del planeta. Si se limita el análisis a la extensión del territorio de un país, existen dos medios habituales de obtención

de crudos: (i) por extracción, en el propio territorio, ó (ii) por importación, desde naciones extranjeras.

Obtención de Petróleo en Argentina

En nuestro país específicamente, la fuente principal de crudos se concentra en la explotación de pozos localizados en cuencas sedimentarias que abarcan diversas regiones del territorio nacional. En la República Argentina se han identificado más de 20 cuencas sedimentarias, con una superficie total de 1.845.000 km², aproximadamente. Sólo cinco de las cuencas continentales se encuentran activas, en una superficie que alcanza los 590.400 km². Si se analiza solamente la porción emergida, las cuencas bajo explotación abarcan un 40% de lo que en la actualidad se conoce como cuencas útiles a los fines petroleros.

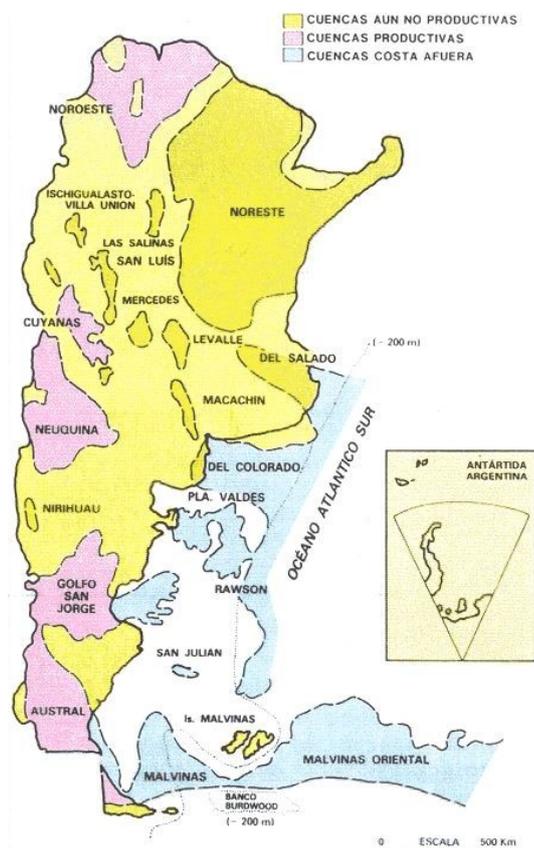


Figura I.4. Cuencas Sedimentarias Argentinas

Tal como se ilustra en el mapa de la Figura I.4, las principales cuencas productivas en Argentina son:

- (1) Cuenca del Noroeste: Promisoria hace treinta años. Los pozos de Tartagal, Madrejones y Campo Durán se han estancado y Caimancito (Jujuy) está en vías de extinción. Representa algo más del 2% de la producción nacional de los últimos tres años.
- (2) Cuenca Cuyana: Principalmente en Barrancas y La Ventana pues el distrito inicial, Tupungato, está casi agotado. Aporta cerca del 6% del total extraído en el país. Sumando los yacimientos de Malargüe (Cuenca Neuquina), la provincia de Mendoza produce el 14% del total, ocupando el cuarto puesto.
- (3) Cuenca Neuquina: El 43% de la producción nacional se reparte entre Plaza Huincul (Neuquén) y en otra zona más al norte, que llega a Catriel (Río Negro) y Medanito (La Pampa). La provincia de Neuquén es la primera productora nacional, con el 27% del volumen total de crudos.
- (4) Cuenca del Golfo San Jorge: Se extiende alrededor de Comodoro Rivadavia (Chubut) y comprende Pico Truncado y Cañadón Seco, en el norte de la provincia de Santa Cruz. Es otra de las cuencas principales, que produce el 43% del total extraído en el país. Provincia por provincia, Chubut y Santa Cruz ocupan el segundo y tercer puesto, proveyendo el 24% y 21% del total nacional, respectivamente.
- (5) Cuenca Austral: Situada a ambas márgenes del estrecho de Magallanes. Comprende El Cóndor y Cerro Redondo, en Santa Cruz, y la Bahía de San Sebastián, en Tierra del Fuego (y probablemente las inmediaciones de las Islas Malvinas). Aporta otro 6% a la producción nacional.

Estas regiones proveen a las refinerías de crudos con características claramente disímiles. Es habitual clasificar a los crudos dentro de tres grandes tipos, considerando sus atributos específicos y los subproductos que se obtienen de su destilación:

- (A) **Petróleos Asfálticos:** Negros, viscosos y de elevada densidad: 0,95 g/ml. En la destilación primaria producen poca nafta y abundante fuel oil, quedando asfalto como residuo. Petróleos asfálticos se extraen del flanco sur del Golfo de San Jorge (Chubut y Santa Cruz).
- (B) **Petróleos Parafínicos:** De color claro, fluidos y de baja densidad: 0,75-0,85 g/ml. Rinden más nafta que los asfálticos. En el proceso de

refinación, al obtenerse aceites lubricantes, se separa parafina. Mendoza y Salta poseen yacimientos de petróleos parafínicos.

- (C) **Petróleos Mixtos:** Tienen características y rendimientos comprendidos entre las otras dos variedades principales. Aunque sin ser iguales entre sí, los petróleos de Comodoro Rivadavia (Chubut) y de Plaza Huincul (Neuquén) son de base mixta.

Sistemas Múltiples de Captación de Crudos

La primera función de importancia de los ductos como medios de transporte en la cadena de suministro de los combustibles es la de **recolección** o **captación**. Los sistemas de captación (“gathering lines”) son redes de oleoductos que concentran los volúmenes de crudos producidos en diversos pozos de una dada región, transportándolos hacia la terminal de cargas más próxima. En general, están configurados en una estructura de árbol, con flujo unidireccional, centralizando el crudo desde los pozos de extracción hacia una misma terminal de destino.

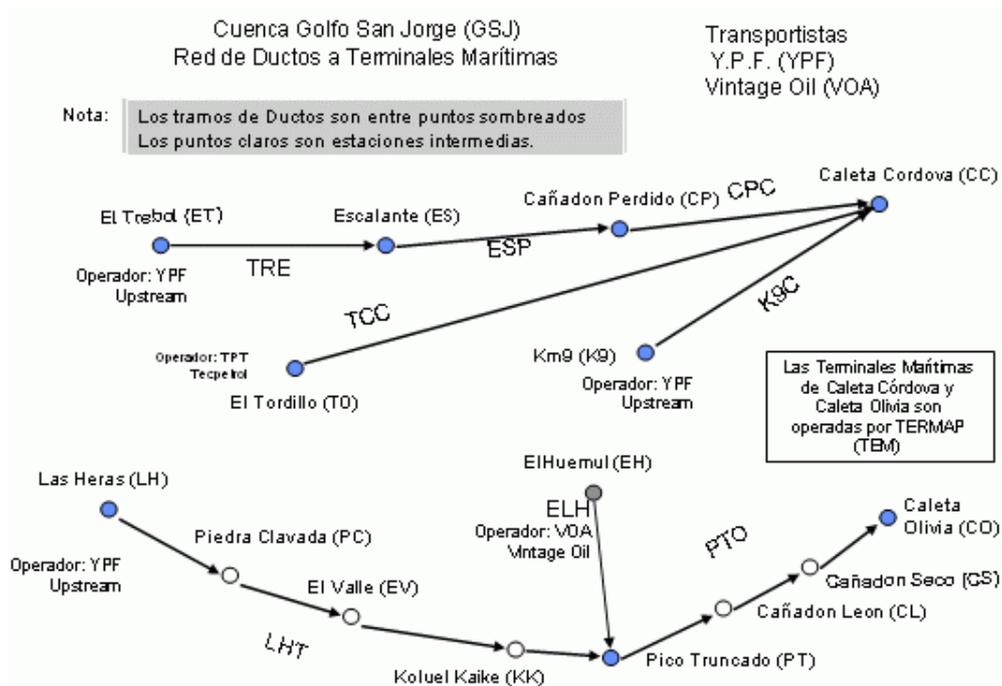


Figura I.5. Oleoductos de Recolección en la Cuenca del Golfo San Jorge

Como ejemplos de “gathering lines” en nuestro país pueden citarse los oleoductos de la Cuenca del Golfo San Jorge (GSJ), que transportan el petróleo

obtenido en los pozos de la región hacia dos terminales marítimas de suma importancia: Caleta Córdova (CC), próxima a Comodoro Rivadavia (provincia de Chubut) y Caleta Olivia (CO), en el norte de la provincia de Santa Cruz (ver Figura I.5). Ambas terminales primarias colectan todos los crudos de la región del Golfo San Jorge, que luego son transportados por grandes buques hacia los centros de almacenamiento y distribución desde donde se abastece a las refinerías. Tal como puede observarse en el esquema de la Figura I.5, existen numerosos puntos donde se “inyectan” crudos a cada una de las “ramas” del sistema de recolección. Estos nodos disponen de tanques de almacenamiento temporal de crudos de medianas dimensiones.

Las diversas compañías que explotan los pozos petroleros de una región pretenden entregar sus crudos en las terminales de carga con la mayor prontitud posible, para evitar que sus tanques de almacenamiento se vean colapsados y deban detener la extracción, algo que puede resultar sumamente oneroso. Al mismo tiempo, desean reducir los altos costos que insume el mantenimiento del inventario de crudos en tanques, y cumplir con la entrega de los volúmenes pactados, en las fechas o “due-dates” comprometidas.

Sin embargo, el oleoducto es en estos casos un recurso común y compartido, cuya utilización debe ser coordinada eficientemente para satisfacer las necesidades de todos los actores interesados. La tarea de programar el transporte de cargas o lotes de crudos en una línea de captación es uno de los problemas aún no abordados en la literatura, que reviste suma complejidad para las unidades de negocio “upstream” de las grandes compañías petroleras del mundo.

El mapa de la Figura I.6 ilustra en forma detallada el oleoducto de captación Las Heras – Caleta Olivia, en la provincia de Santa Cruz, operado por la empresa Repsol-YPF. Este sistema fue construido en dos tramos: Las Heras – Pico Truncado (dos tuberías paralelas de 10” y 12” de diámetro y 72 km de longitud), y Pico Truncado – Caleta Olivia (18” de diámetro y 53 km de longitud). Transporta crudos provenientes de 15 puntos de producción, a cargo de 7 empresas distintas (Repsol-YPF y Vintage, entre las más importantes), a razón de 19.704 m³ por día. Este volumen es almacenado en su totalidad en la terminal marítima de Caleta Olivia, operada por la firma Termap (Terminales Marítimas Patagónicas S.A.).

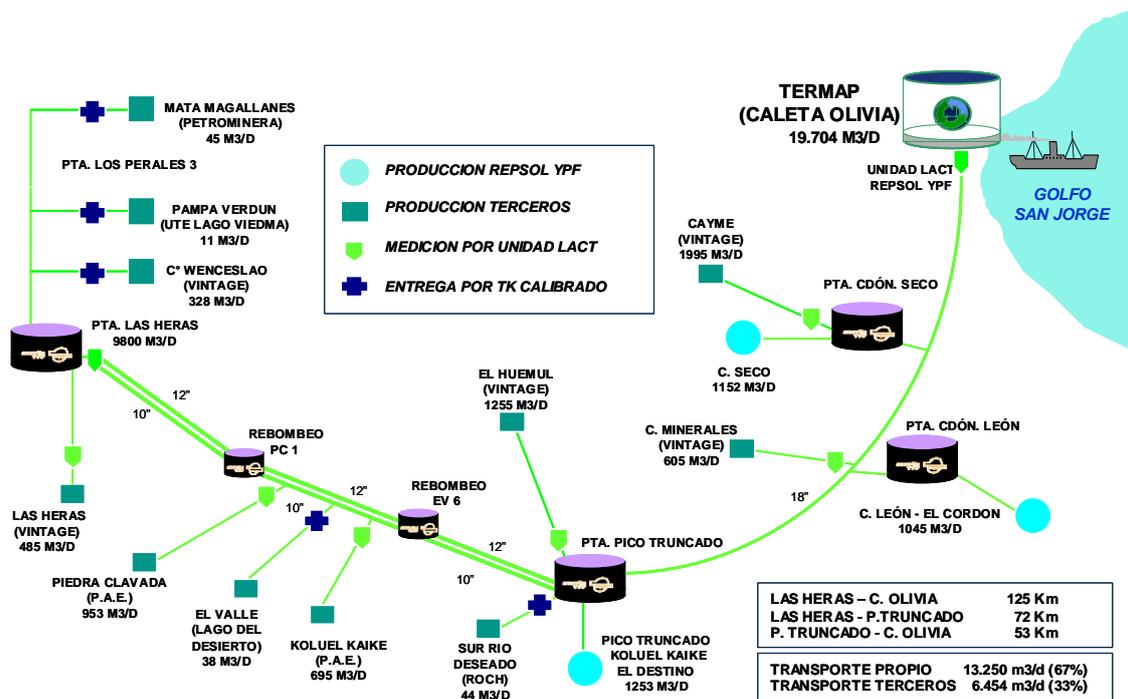


Figura I.6. Sistema de Captación Las Heras – Caleta Olivia

I.3.2 Operaciones “Midstream”: Abastecimiento de Crudos

Una vez colectados en la terminal de carga próxima a los yacimientos de explotación, los diferentes tipos de crudo se envían hacia las unidades de refinación a través de dos medios de transporte habituales: grandes buques tanque (“tankers”) y oleoductos simples de diámetro mayor. Estos últimos constituyen la opción más conveniente, siempre que se disponga de ellos para llevar adelante el transporte. Confiabilidad, puntualidad, seguridad y bajos costos de operación (comparables a los del transporte marítimo) representan los factores más importantes para inclinarse por su utilización.

Estos enormes conductos de hasta 50” de diámetro (1,27 m) a los que habitualmente se denomina Oleoductos Principales o Troncales (“Trunk Lines”) han ampliado significativamente su prestación en los últimos años, debido al sinnúmero de ventajas que lo destacan de sus competidores directos, los buques tanque. El gráfico de la Figura I.7 ilustra claramente la evolución del uso de oleoductos en el transporte de crudos de los Estados Unidos de América, para convertirse en el medio de mayor utilización en la actualidad, con el 75% del total.

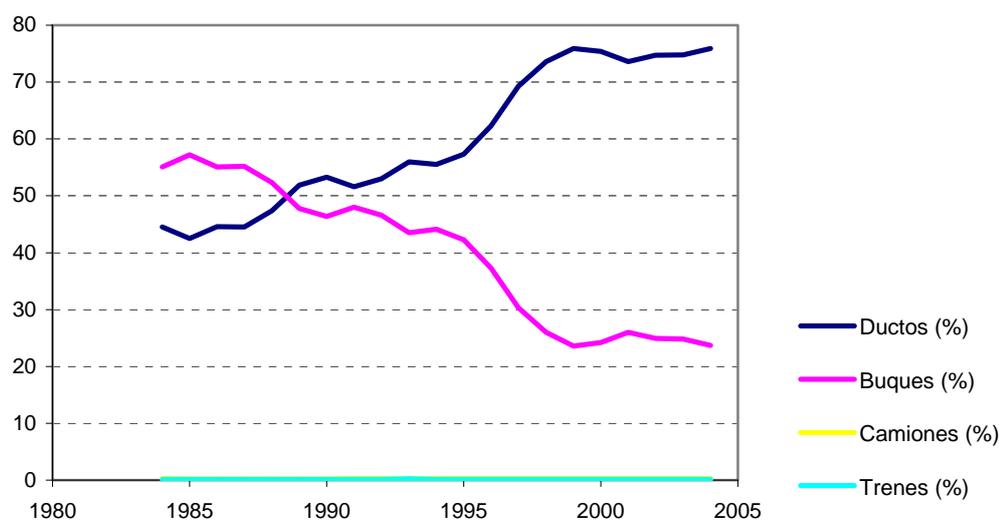


Figura I.7. Evolución del Uso de Oleoductos en los EE.UU.

Oleoductos Principales

Resulta importante identificar las líneas de transporte principales que dispone nuestro país para movilizar petróleo. El esquema de la Figura I.8 representa el flujo de crudos desde las cuencas Neuquina, Golfo San Jorge y Austral, hacia una de las terminales petroleras más importantes del país, situada en Puerto Rosales (zona portuaria de Bahía Blanca).

La terminal de cargas de Puerto Rosales posee actualmente una capacidad de almacenamiento superior a los 480.000 m³, y su operación está a cargo de la empresa “Oiltanking EBYTEM S.A.”. Este centro logístico constituye un punto clave en el abastecimiento de crudos, pues concentra los volúmenes provenientes de las dos regiones de mayor producción nacional: la cuenca Neuquina, a través del Oleoducto del Valle (Oldeval S.A.) – identificado en el mapa como ① –, y las cuencas del Sur (Austral y Golfo San Jorge), por medio de buques tanques que arriban desde las Caletas. Más aún, esta terminal abastece a gran parte de las refinerías del país, a través del oleoducto principal Puerto Rosales – La Plata (②), operado por Repsol-YPF. Asimismo, representa uno de los centros más importantes de importación y exportación nacional de petróleo, disponiendo de boyas de amarre de gran capacidad de carga y descarga.



Figura I.8. Transporte Principal de Crudos en Argentina

Definir la secuencia y el tamaño de los lotes de crudos a transportar es una tarea sumamente crítica para las operadoras logísticas de oleoductos principales. Si la densidad del petróleo contenido en lotes adyacentes difiere en forma notoria, es indispensable introducir en la línea separadores físicos o “pigs” (ver Figura I.9) que eviten el denominado efecto de “cuña”. Este fenómeno se produce cuando la especie más pesada fluye por debajo de la liviana, favoreciendo la indefinición de un lote respecto de otro.



Figura I.9. Separadores Físicos (“Pigs”) de Cuerpo Metálico y Sellos de Poliuretano para Flujo Unidireccional y Bidireccional

Si bien resulta costoso (por el mayor costo de bombeo) y problemático movilizar mecanismos de separación dentro de la tubería, los inconvenientes que genera la variabilidad de las propiedades del petróleo en la unidad de refino muchas veces justifican su uso. En consecuencia, es muy importante minimizar el número de transiciones de crudos en la secuencia de lotes (“batch train”) procurando al mismo tiempo mantener abastecidas a las destilerías de la materia prima requerida, en función de los productos que demanda el mercado.

I.3.3 Operaciones “Downstream”: Refino y Distribución de Combustibles

Las destilerías de petróleo son los componentes de la cadena de suministro que convierten este recurso natural en un sinnúmero de productos específicos, aptos para cada prestación. La variedad de compuestos refinados obtenidos en este proceso es realmente amplia. Desde combustibles para vehículos, como naftas, gasoil, y jet-fuel, hasta productos petroquímicos para la fabricación de polímeros, por mencionar solo algunos. El mercado de los derivados del petróleo es extremadamente complejo y manifiesta un continuo crecimiento. Por esta razón, resulta muy importante establecer mecanismos eficientes para alcanzar una logística ajustada del sistema, que permita abastecer los productos requeridos, en la cantidad y tiempos que exigen las condiciones cada vez más competitivas de los mercados.

Los medios de transporte comúnmente utilizados para llevar adelante el transporte de productos refinados son: barcos, trenes, camiones y ductos. En general, la estructura logística de toda cadena de suministro de combustibles hace uso combinado de todos estos medios. El transporte principal de productos desde las refinerías hacia los grandes centros de distribución se realiza mayoritariamente por tuberías múltiples o poliductos. Las razones son muy claras: costos reducidos, confiabilidad y seguridad. A pesar de ser los medios más lentos (no más de 10 km/h), operan las 24 horas de los 365 días del año. Están mucho menos expuestos a las condiciones climáticas, y según estadísticas de los últimos años, poseen por lejos el menor índice de accidentes de impacto medio-ambiental.

Alrededor del 60% del transporte de combustibles refinados en los EE.UU. se realiza a través de poliductos. Tal como puede observarse en la gráfica de la Figura I.10, existe una tendencia marcada a sustituir los movimientos en vías fluviales por tuberías o ductos. Los barcos, mucho menos

confiables por su alta dependencia de fenómenos climáticos y con alto índice de derramamiento, han visto limitada su utilización a aquellos recorridos en los que no se dispone aún de tuberías.

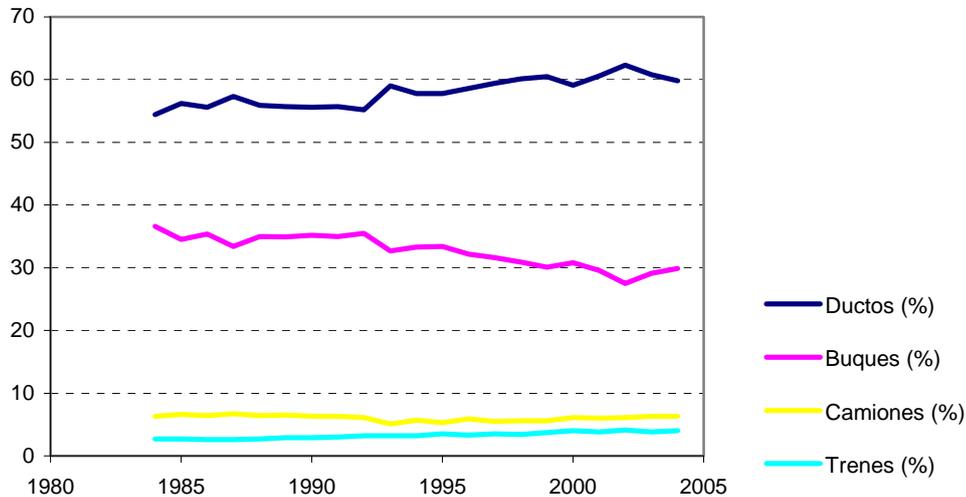


Figura I.10. Evolución del Uso de Poliductos en los EE.UU.

El transporte de productos refinados a través de un poliducto simple de 1000 km de extensión y 20" de diámetro que opera sin interrupciones, alcanza un costo anual de **64 millones de dólares**, movilizando a razón de **800 toneladas de producto por hora**. Si quisiese efectuarse el traslado por medio de camiones cisterna a este mismo ritmo, insumiría anualmente una cifra superior a los **1148 millones de dólares** (R. Ballou, 2004).

Redes de Distribución de Combustibles por Poliductos

Las redes de distribución de productos refinados a través de poliductos suelen presentar diferentes niveles de complejidad en su configuración. Desde poliductos simples con origen y destino únicos, hasta sistemas con múltiples puntos de inyección y terminales intermedias, ramificaciones e incluso líneas de recirculación. Por citar sólo algunos ejemplos, en orden de complejidad creciente, puede mencionarse el poliducto que opera la firma CLC (Portugal) el cual conecta una refinería con la terminal portuaria donde se almacenan y comercializan los combustibles (Relvas y colab. (2006 y 2007)). Un grado de dificultad mayor se presenta en el poliducto OSBRA, propiedad de la firma Petrobras (Brasil), que transporta combustibles desde una única refinería en Paulínia (São Paulo) hacia la capital del país, Brasilia, y en el trayecto entrega

combustibles a cuatro localidades de importancia, dispuestas en puntos intermedios a lo largo del recorrido de 955 km (Rejowski y Pinto, 2004). El caso más dificultoso en la operación de poliductos simples se presenta en aquellas líneas comunes (“common-carriers”), a través de las cuales deben transportarse los combustibles de múltiples compañías para entregarlos en sus propios destinos. Un ejemplo clásico se presenta en el poliducto “Colonial Pipeline” (EE.UU.) ilustrado en la Figura I.11, que comunica las refinерías de la región del Golfo de México con los grandes centros de distribución y consumo, ubicados en la Costa Este del país, en un recorrido total de más de 2500 km (Jittamai, 2004).

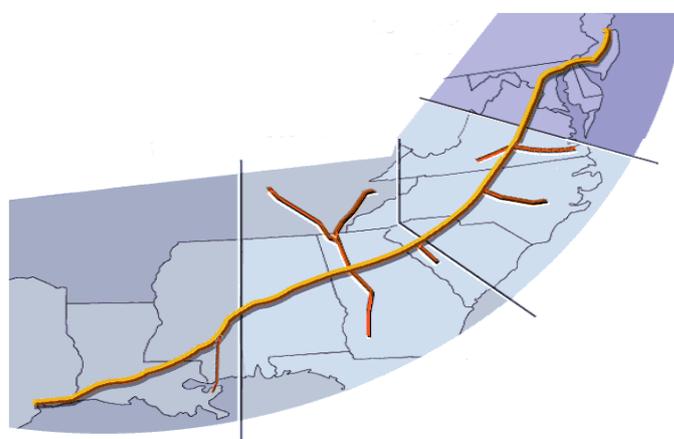


Figura I.11. Sistema de Distribución “Colonial Pipeline” (EE.UU.)



Figura I.12. Red Logística de Combustibles de CLH (España)

En configuraciones aún más intrincadas, pueden disponerse ramificaciones y comunicaciones múltiples entre refinerías, puertos y centros de distribución y consumo, conformando redes logísticas complejas, tal como el caso de la red de poliductos que opera CLH, en España (García y colab., 2008), cuyos tendidos se visualizan en el mapa de la Figura I.12.

En nuestro país específicamente, la red logística de distribución de combustibles consta de más de 2000 km de poliductos, que comunican refinerías muy importantes (La Plata -Bs. As.-, Luján de Cuyo -Mendoza- y Campo Durán -Salta-), con grandes centros de distribución, próximos a mercados de muy alta demanda (La Matanza -Bs. As.-, Villa Mercedes -San Luis-, Monte Cristo -Córdoba- y San Lorenzo -Santa Fe-). El poliducto Campo Durán – Monte Cristo es operado por la firma Refinor, mientras que el resto de las líneas que abastecen productos desde las refinerías de Luján de Cuyo y La Plata son explotados por Repsol-YPF (ver Figura I.13). Existe además un poliducto de 600 km que transporta licuados del gas natural (NGL), desde Loma La Lata (Neuquén) hacia Bahía Blanca (Bs. As.) donde se fraccionan y acondicionan los diversos componentes.

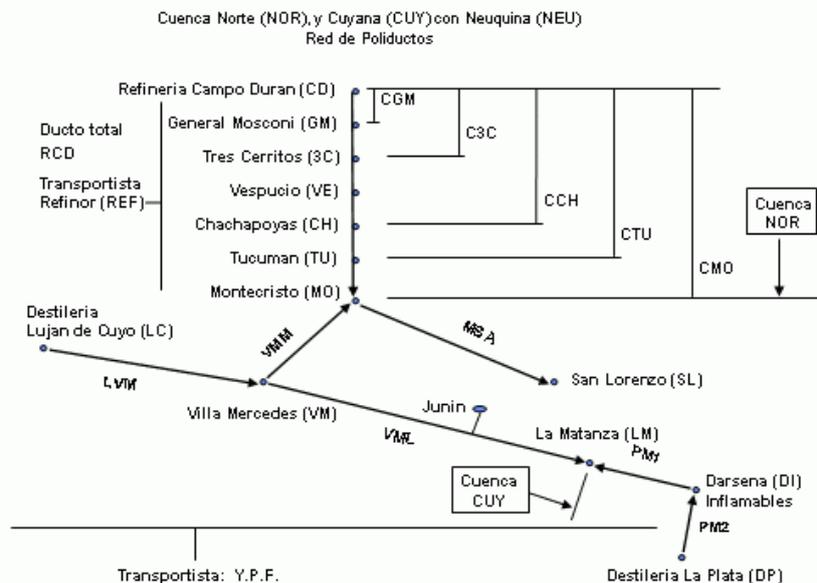


Figura I.13. Red de Poliductos de Argentina

I.4 Resumen

La utilización de oleoductos y poliductos para el transporte de crudos y destilados en la cadena de abastecimiento de combustibles es cada vez mayor.

Los menores costos de operación y la alta confiabilidad de estos sistemas promueven su utilización en reemplazo de otros medios de transporte menos convenientes como los buques tanque. Sin embargo, no siempre se dispone de una línea para abastecer a cada uno de los destinos, y es fundamental recurrir al uso combinado con otros medios de transporte.

Por otra parte, la conformación de lotes dentro de la tubería es una característica distintiva de estos sistemas, que obliga a minimizar el número de transiciones y la degradación de combustibles por interfase. En este contexto, la programación y coordinación de las operaciones de transporte por ductos reviste una importancia fundamental. Por un lado, los sistemas de captación y transporte por oleoductos deben proveer los crudos específicos a ser procesados por cada unidad de destilación. Por el otro, los poliductos deben abastecer de combustibles a los mercados de consumo, a los tiempos en que se los requiere, teniendo en cuenta la disponibilidad de productos en cada una de las refinerías que alimentan el sistema.

No existe hasta hoy un enfoque de representación eficiente de la problemática, que permita encontrar programas económicos de operación, en tiempos computacionales acordes a las necesidades. Si bien se han presentado representaciones aisladas de diferentes sistemas, la literatura disponible no ofrece oportunidad de extender los conceptos a configuraciones más complejas, con más de un punto posible de inyección de combustibles en el ducto. El objetivo de esta tesis es hallar un modelo de representación eficiente del problema de operación de poliductos, que sienta las bases a partir de las cuales puedan abordarse configuraciones de alta complejidad, tal como los casos reales presentados en este capítulo, cuya coordinación plantea enormes desafíos para las grandes compañías petroleras del mundo.

Capítulo II

Revisión Bibliográfica:
Enfoques y Técnicas de
Representación del Problema
de Programación del
Transporte por Poliductos

II.1 Análisis Preliminar del Estado del Arte

La programación del transporte de derivados de petróleo por poliductos es un problema ciertamente complejo. Muchas de las empresas petroleras a cargo de la elaboración y comercialización de combustibles enfrentan severas dificultades para obtener al menos un programa de distribución factible, que satisfaga las necesidades de todos los clientes en el tiempo requerido. Al presente, no se ha reportado la utilización por parte de la industria de técnicas eficientes para la operación de poliductos, y gran parte de las herramientas de soporte para la programación de estas líneas son procedimientos muy elementales, basados en la experiencia previa del planificador (Crane y colab., 1999; Magatão y colab., 2004).

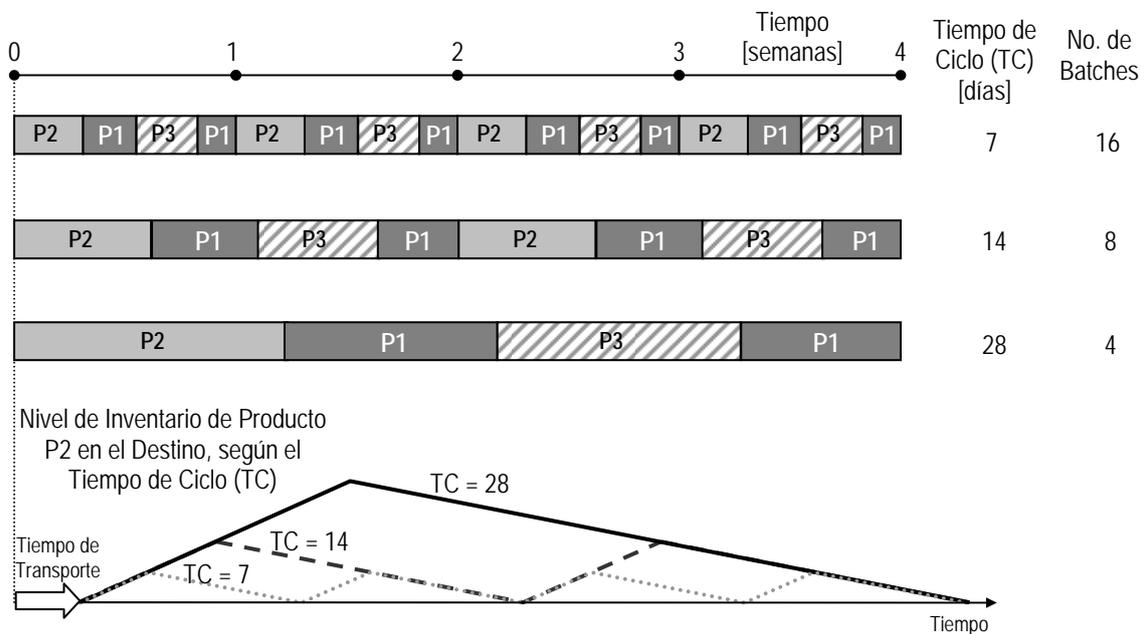


Figura II.1. Diferentes Alternativas para la Programación Cíclica de Poliductos

En la práctica, la programación cíclica de envíos constituye la técnica más empleada, y consiste en dividir la demanda mensual de cada destino en tantas partes como ciclos de bombeo se deseen efectuar durante el mes (Sheppard, 1984). Cada ciclo implica la misma secuencia de productos y los mismos tamaños de los envíos o “batches”. Mientras más ciclos se dispongan, mayores serán los gastos en degradación de interfases, pero mejor distribuida será la entrega de productos en el tiempo, y por lo tanto, habrá menores niveles de inventario en tanques. En la Figura II.1 se muestran tres diferentes programaciones cíclicas, con igual secuencia de productos (P2-P1-P3-P1) pero

diferentes tiempos de ciclo (7, 14 y 28 días) y tamaños de los lotes transportados. Se observa un descenso importante del nivel de inventario de P2 al disminuir el tiempo de ciclo, contra un incremento notorio del número de envíos. Sin embargo, para diagramar los ciclos es fundamental disponer de la información sobre los requerimientos mensuales de cada destino hasta cinco días antes de iniciar el mes a programar, como es práctica en la empresa “Shell Pipeline” (EE.UU.).* Pero la dinámica propia de los sistemas logísticos actuales exige una permanente adaptación del programa, y esto genera enormes costos para las compañías operadoras que podrían evitarse mediante el uso de herramientas más avanzadas.

Las primeras técnicas para la resolución del programa de operaciones o “scheduling” de refinerías que utilizan oleoductos como medios de suministro de crudos se publicaron hace más de veinte años. El problema planteado era coordinar las actividades de abastecimiento y destilación de petróleo en refinerías para satisfacer la creciente demanda del mercado de combustibles. No obstante, las representaciones detalladas del contenido de los ductos surgieron recién en la última década, a raíz de la necesidad de llevar adelante un seguimiento preciso de los lotes dentro de la línea. Aún así, las contribuciones al conocimiento sobre este tema han sido escasas, y muchos de los trabajos corresponden a poliductos simples, con un único origen y una única terminal de destino. Con el tiempo ha ido sumándose complejidad a la configuración del poliducto, hasta abordar en la actualidad problemas con múltiples destinos a lo largo de su recorrido.

En el desarrollo de este capítulo se describirán las características principales del problema de programación de operaciones en sistemas de transporte multiproducto por tuberías, para luego realizar un análisis exhaustivo de los enfoques presentados en la literatura.

II.2 Caracterización del Problema

Una de las decisiones más importantes en la programación de poliductos es la secuencia de productos a inyectar en la línea. De esta decisión dependen directamente los costos de degradación por interfase, que constituyen uno de los componentes críticos en la evaluación de todo programa de bombeo. Para caracterizar la complejidad asociada a la programación de poliductos, puede analizarse un problema simple pero muy

* <http://shellpipeline.com/NomDueDates.pdf>

representativo presentado por Milidiú y colab. en el año 2003. El caso consiste en una tubería que conecta un origen con un destino único, para la cual debe encontrarse una secuencia de productos “factible” (sin interfases o transiciones de productos “prohibidas” por incompatibilidad) que permita transportar los lotes previstos de un extremo al otro de la línea. Por simplicidad, todos los “batches” poseen un mismo tamaño igual al contenido volumétrico del ducto. Más aún, la inyección de un “batch” en la línea toma en cualquier caso un tiempo fijo, y en cada fase de bombeo se actualizan los inventarios de producto en tanques de la refinería (origen) y del depósito (destino). Los autores lograron representar el ejemplo en un grafo sencillo, y a través de un análisis matemático concluyeron que el problema de hallar una secuencia de inyección factible es análogo al de encontrar un camino Hamiltoniano en una red de nodos interconectados. En resumen, los investigadores demostraron que el caso más simple de programación de poliductos es NP-Completo, y que el dominio de soluciones de un problema real es ciertamente desafiante. En la programación típica de poliductos se debe considerar, además, la necesidad de dimensionar los “batches” de producto a inyectar, optimizar el caudal de bombeo, controlar los inventarios de combustibles en el tiempo, respetar las fechas de entrega pactadas (“due-dates”), y contemplar configuraciones más complejas, con más de un origen o destino a lo largo del trayecto, entre otras.

El proceso de planeación del transporte por poliductos puede dividirse en dos grandes instancias: *el programa de inyección* y *el programa de descarga*. En tuberías con múltiples ingresos, debe determinarse primero la terminal donde se introduce cada lote, la secuencia de productos a impulsar en la línea, el tamaño de los envíos, y los tiempos de inicio y culminación de cada corrida de bombeo, constituyendo el *programa de inyección* o “*input schedule*” del sistema. El diagrama de la Figura II.2 representa un programa de inyección de un poliducto simple de 20” de diámetro, con dos terminales de acceso desde donde parten los envíos. A la izquierda del gráfico pueden observarse los intervalos de bombeo de los lotes. Cada elemento horizontal de la figura representa el estado del poliducto al término de cada inyección. Sirve para monitorear la posición de los “batches” de productos en tránsito, a lo largo del tiempo. Desde la hora 0,00 h y hasta la hora 10,00 h, un lote de 10000 m³ de combustible *P1* ingresa al ducto en el nodo *S1* (que se indica mediante una flecha hacia el interior del ducto en *S1*). La distancia entre los

puntos de inyección es de 49,34 km, por lo que el nuevo envío completa exactamente el volumen contenido entre ambas estaciones. A continuación, un lote más pequeño, con 5000 m³ de producto P3 se impulsa en el centro S2, desde el instante $t = 10,00$ h y hasta $t = 15,00$ h. Mientras tanto, el primer lote de P1 permanece inmóvil. A partir de entonces y hasta la hora 25,00 h, otro lote de 10000 m³, pero de la especie P2, se bombea en el nodo S1 desplazando a los lotes previos 49,34 km hacia delante. En el intervalo [25,00 h; 30,00 h], un lote de 5000 m³ de P4 ingresa en S2, movilizandolos lotes de P3 y P1, mientras el “batch” de P2 se mantiene en reposo. La secuencia final de especies dentro del ducto es: P2-P4-P1-P3, aunque el orden cronológico de inyección es particularmente distinto: P1_{S1}-P3_{S2}-P2_{S1}-P4_{S2} (el subíndice indica la terminal de ingreso).

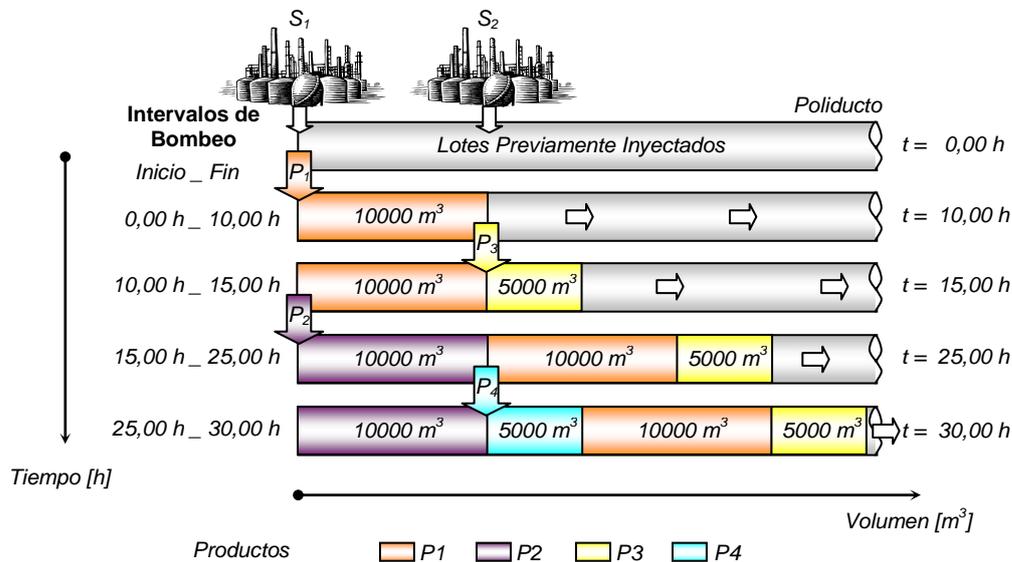


Figura II.2. Programa de Inyección de Lotes en el Poliducto

Normalmente, los poliductos transportan derivados de petróleo en estado líquido, a presiones que no superan las 100 atm en la salida de las estaciones de bombeo. Por lo tanto, puede asumirse como válida la hipótesis de incompresibilidad de los líquidos. Como la línea permanece completamente llena en todo momento, cada unidad que ingresa en una de las terminales de origen produce la transferencia simultánea de otro volumen equivalente en uno o más centros de recepción del ducto. La forma en que se distribuye el material transportado entre los destinos del sistema constituye el *programa de descarga* o “*output schedule*”. En esta segunda instancia del proceso de

planeación, debe ponerse especial cuidado en la localización de cada lote dentro de la tubería. Para poder transferir material desde el poliducto a una terminal de recepción, el envío debe estar correctamente posicionado en la coordenada de acceso al depósito, y todos los tramos que comunican los nodos de origen y destino tendrán que ser activados. Asimismo, para cada corrida de inyección deben determinarse los volúmenes parciales o “cortes” de cada lote en tránsito impulsados hacia las distintas terminales durante su transcurso, para satisfacer a término las demandas del mercado. En una última fase de programación detallada, se establece el tiempo exacto en que se producen las transferencias de lotes hacia los depósitos, procurando minimizar el número de detenciones y arranques de cada tramo del poliducto, sin desabastecer a los tanques de las terminales de recepción. En la Figura II.2 no se indican las descargas a las terminales receptoras durante cada inyección para lograr mayor claridad en la interpretación.

Retomando el ejemplo presentado en esta misma sección, asumamos que a tiempo $t = 50,00$ h los cuatro lotes inyectados en el intervalo $[0,00$ h ; $30,00$ h] han alcanzado el final del poliducto, según se muestra en la primera línea de la Figura II.3. Existen dos destinos posibles para los lotes ($D1$ y $D2$) y el volumen contenido por el ducto entre ambas terminales de recepción es de 10000 m^3 . Las descargas de productos a centros de distribución se indican mediante flechas hacia el exterior del ducto, que apuntan a $D1$ o $D2$, respectivamente.

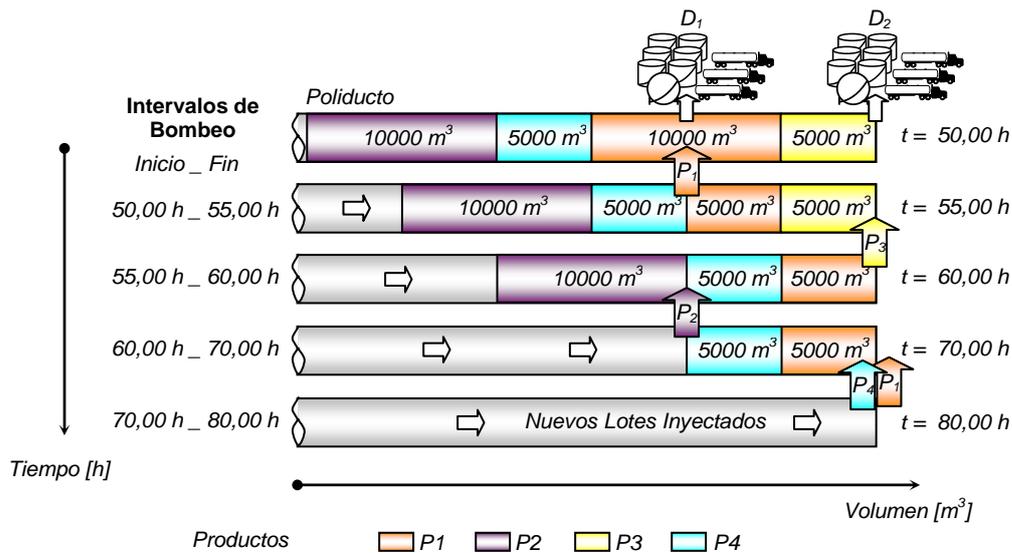


Figura II.3. Programa de Descarga de Lotes desde el Poliducto

El diagrama de la Figura II.3 muestra la evolución de los lotes dentro de la tubería a medida que se ejecutan nuevas corridas de bombeo, conforme al *programa de descargas* establecido por el operador. En este caso, no se muestran las inyecciones en las terminales de ingreso, para mayor claridad. Durante la primera ejecución, se transfieren 5000 m³ de *P1* hacia la terminal *D1*. Es importante notar que si el poliducto opera en un único sentido, el nodo *D1* no puede retirar más que ese volumen de *P1*, pues la primera mitad del lote ya ha superado la ubicación de dicho destino. Posteriormente, se activa el último tramo de tubería que permanecía en reposo, para entregar el envío de *P3* al centro *D2*, cuya descarga se completa a tiempo $t = 60,00$ h. En ese momento, el tramo *D1-D2* vuelve a detenerse y comienza a derivarse *P2* hacia el destino *D1*. Por último, el programa prevé la descarga de *P1* y *P4* en tanques de la terminal *D2*. A la hora 80,00 h, los cuatro lotes de productos han sido entregados. En orden cronológico, los despachos programados son: 5000 m³ de *P1* a *D1*, 5000 m³ de *P3* a *D2*, 10000 m³ de *P2* a *D1*, 5000 m³ de *P1* y 5000 m³ de *P4* a *D2*.

De la coordinación efectiva de los programas de ingreso y derivación de lotes dependen los costos operativos involucrados en el plan de transporte. Son factores determinantes la operación de bombas en horario normal como en horas pico, el volumen de combustible degradado en las interfases, los niveles de stock de productos en tanques de las refinerías y centros de distribución, el cumplimiento a tiempo de las órdenes de despacho comprometidas con los clientes y el nivel de utilización del sistema de transporte, entre otros. Tales decisiones operativas pueden optimizarse a través de una programación eficiente de las operaciones de bombeo por poliductos.

II.3 Clasificación de los Modelos de Programación de Poliductos

El problema de programación o “scheduling” de poliductos ha cobrado una importancia notable en los últimos años, sobre todo al incrementarse el uso de estos medios de transporte en las operaciones logísticas vinculadas a la distribución de combustibles. Se presentan dos clasificaciones frecuentes de los modelos de programación de poliductos. Una de ellas está basada tanto en la función como en la topología de la red de transporte, y la otra, en el enfoque metodológico propuesto para la resolución del problema.

II.3.1 Clasificación de los Sistemas de Transporte por Poliductos

Clasificación Funcional de Poliductos

Los sistemas de transporte de combustibles por poliductos se pueden dividir en tres tipos, según su **función**: (i) de *concentración*, (ii) de *transmisión* y (iii) de *distribución*. Los poliductos de *concentración* (“gathering lines”) colectan los productos refinados que se producen en distintas destilerías, y los conducen hacia estaciones terminales comunes donde se almacenan temporalmente. Desde allí se conforman grandes lotes de combustible que se transportan a través de una tubería troncal de alta presión, comúnmente denominada poliducto de *transmisión* (“transmission line”), que posee un diámetro mayor (de 12” a 20”) y abastece uno o más destinos a lo largo del trayecto.

El programa de transporte de los poliductos troncales busca minimizar el volumen de producto-mezcla generado en las interfases entre lotes sucesivos, haciendo estos lotes tan grandes como sea posible, sin desabastecer a los destinos del resto de los combustibles. Los productos provenientes de distintas destilerías, que aún así comparten las mismas especificaciones, pueden unificarse y enviarse en forma conjunta como un único “batch” hacia múltiples destinos. Este modo de operación se denomina “fungible” o consolidado. Algunos poliductos de transmisión suelen poseer configuraciones simples, conectando una única fuente con un solo destino, mientras otros son mucho más complejos, con diversas fuentes, destinos y conexiones “laterales” hacia otros poliductos.

Por último, las líneas de *distribución* (“distribution lines”) operan a presiones más bajas, en tramos relativamente cortos, con diámetros menores (hasta 10”) y diversas ramificaciones. El objetivo es abastecer de combustibles a los grandes centros de consumo desde las terminales de distribución de los poliductos troncales. En general, transportan lotes más pequeños, cada uno de los cuales se asigna a un único destino, operando en modo “batch” o segregado. En otras palabras, los grandes lotes enviados a través de poliductos troncales se dividen en “batches” más pequeños, que se distribuyen directamente entre grandes clientes o centros de consumo local (por ejemplo, aeropuertos). Sin embargo, el despacho final de combustibles desde los centros de distribución hacia clientes menores y estaciones de servicio se realiza mayormente por medio de camiones cisterna.

Clasificación Topológica de Poliductos

Paralelamente, desde el punto de vista **topológico**, los sistemas de transporte por poliductos pueden clasificarse según el número de nodos de ingreso/egreso y tuberías interconectadas, del modo que sigue:

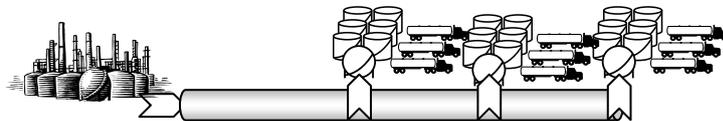
- a. *Poliductos simples, con un único origen y una única terminal de recepción (1-1)*. Representan los sistemas más sencillos. Normalmente, son tuberías de transmisión que comunican una refinería o puerto con un centro de almacenamiento distante o una planta de refino, respectivamente.

Estructura **1-1**



- b. *Poliductos simples, con un único origen y múltiples terminales de recepción (1-N)*. Son sistemas de transmisión un poco más complejos, que vinculan una refinería importante con diversas terminales de distribución próximas a los grandes mercados de consumo.

Estructura **1-N**



- c. *Poliductos simples, con múltiples estaciones de ingreso y diversas terminales de recepción (M-N)*. Típicamente, estos sistemas troncales se denominan transportadores comunes o “common-carriers”, y trasladan combustibles de varias compañías desde los centros de producción hasta las regiones de consumo de un mismo país.

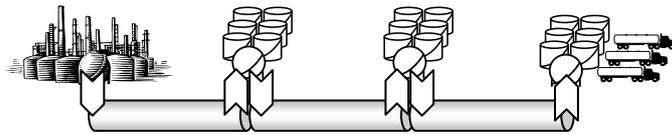
Estructura **M-N**



- d. *Redes de poliductos simples interconectados en serie, con nodos de ingreso, terminales de recepción, y estaciones intermedias con doble propósito (Estructura Serial – ES)*. Estas configuraciones constituyen la

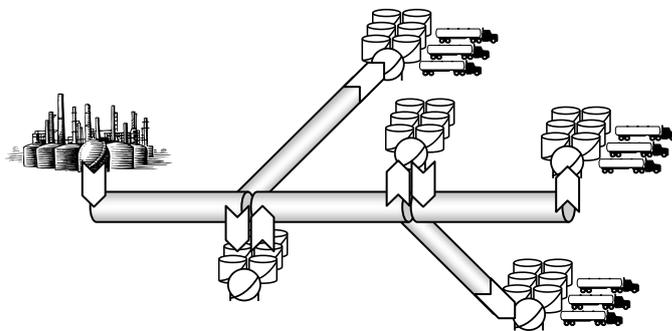
base para la representación de problemas de transporte por poliductos múltiples, que operan en forma coordinada. Algunas estaciones pueden trabajar como terminales de ingreso o descarga de productos. Físicamente, no se trata de una estructura muy distinta a las anteriores. Es tan sólo una forma diferente y ventajosa de representar las estructuras **1-N** y **M-N**. Cada tramo es visto como un poliducto independiente que abastece a los que inmediatamente lo suceden. A la cabecera de cada poliducto se halla una terminal de ingreso y/o de descarga de productos.

Estructura Serial
(ES)

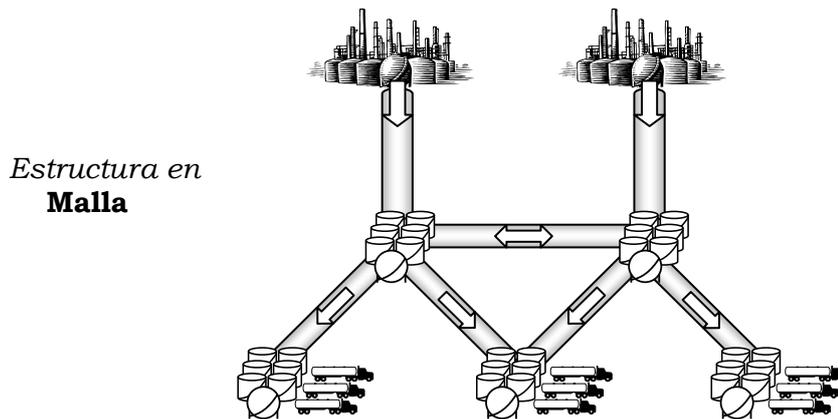


- e. *Redes de poliductos simples configurados en árbol.* Tanto los sistemas de concentración o “gathering lines” como las redes de distribución por poliductos laterales o “lateral pipelines” constituyen sistemas de transporte comúnmente configurados en árbol. Las “gathering lines” permiten transportar la producción de diferentes refinерías a una misma terminal de ingreso al poliducto, mientras que las líneas laterales abastecen de productos de manera directa a clientes importantes a través de derivaciones del conducto troncal en puntos cercanos a los destinos a atender. En este caso, los poliductos individuales no están conectados en serie, sino que presentan una estructura ramificada.

Estructura Tipo
Árbol



- f. *Redes de poliductos en malla, con tuberías múltiples que comunican nodos de producción, almacenamiento intermedio, descarga y distribución de productos.* Estas redes altamente interconectadas conforman cadenas completas de distribución de combustibles por tuberías, y su resolución representa un enorme desafío para las compañías logísticas más importantes del mundo.



Los poliductos suelen clasificarse además según la dirección del flujo de los productos. Las tuberías *unidireccionales* operan en un único sentido, mientras que las *bidireccionales* pueden hacerlo en uno u otro sentido alternativamente, según las necesidades de ambas terminales en los extremos del ducto. No obstante, la operación de tuberías bidireccionales es poco común, y su aplicación se limita a sistemas de dimensiones pequeñas.

En el desarrollo de los capítulos siguientes, se estudiarán en detalle los sistemas de transporte por poliductos unidireccionales más frecuentes, presentados en los ítems a, b, c, y d, en orden de complejidad creciente.

II.3.2 Clasificación Metodológica de las Técnicas de Programación de Poliductos

Conjuntamente con la clasificación estructural, suele hacerse una clasificación adicional basada en el tipo de **metodología** utilizada en el abordaje del problema. Dos tipos de tratamiento han sido empleados:

- A. *Procedimientos Heurísticos*
- B. *Programación Matemática*

La Figura II.4 resume las alternativas más difundidas para la programación de poliductos. En las próximas secciones se analizará la evolución de cada uno de estos enfoques por separado.

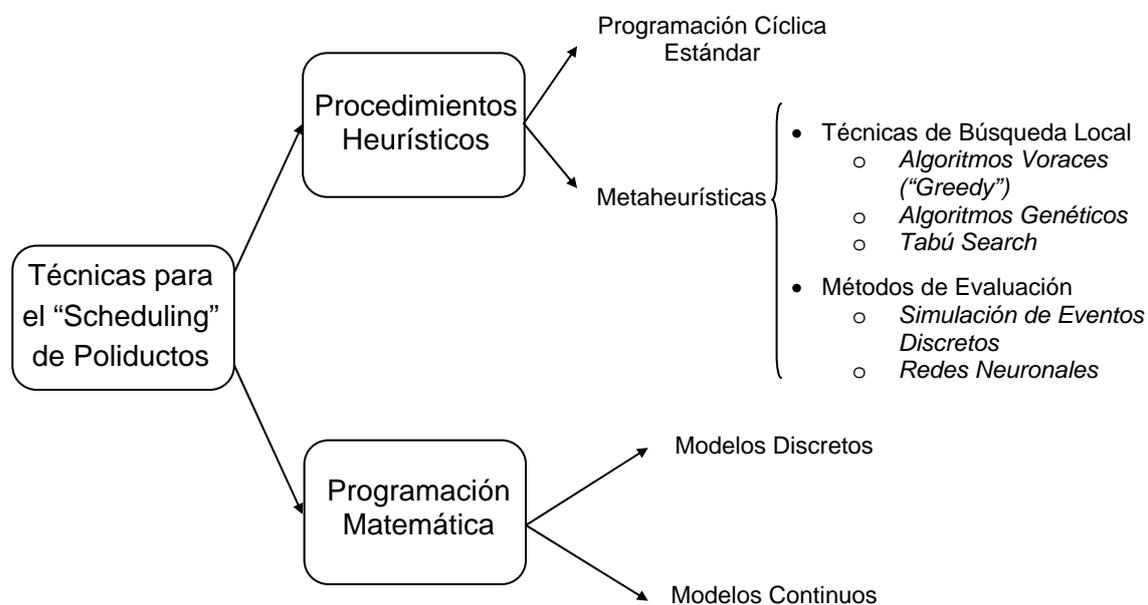


Figura II.4. Clasificación de Técnicas para la Programación de Poliductos

II.3.2.a Procedimientos Heurísticos

Las técnicas de resolución más simples responden a criterios prácticos deducidos a partir de la experiencia previa de los programadores de poliductos. La forma más elemental de hallar soluciones para este problema es a partir de la configuración de un programa de transporte cíclico (Sheppard, 1984). En general, estas técnicas heurísticas primarias adoptan, basadas en la experiencia, “patrones” de secuenciación de productos, y requieren de la asistencia de una simple planilla de cálculos. El tamaño de cada lote de producto inyectado se determina teniendo en cuenta la demanda mensual a atender, el número de ciclos mensuales y el número de lotes de ese producto por ciclo. Constituyen la alternativa más difundida en la industria petrolera de nuestros días. Sin embargo, la configuración de un programa mensual factible puede tomar más de dos días de reuniones entre expertos operadores de las refinerías, los depósitos y los poliductos, y aun así resultar inadecuado (Sasikumar y colab., 1997).

Por otro lado, la dinámica propia de los mercados de combustibles exige una permanente adaptación del programa de operaciones de los poliductos, ya que con frecuencia, la planificación mensual de los envíos inicialmente propuesta se torna inapropiada. Así pues, la programación de operaciones en la cadena de suministro de combustibles ha incorporado en los últimos años técnicas más sofisticadas, que combinan metodologías eficientes para la generación y evaluación de soluciones, como la simulación de eventos discretos, con estrategias de búsqueda local de mejores soluciones a partir de técnicas metaheurísticas, como algoritmos genéticos y “tabú search”, entre las más difundidas.

Los Primeros Trabajos en el Área

El primer esquema de representación detallada del programa de operaciones de un poliducto fue publicado en la literatura internacional por Hane y Ratliff, en el año 1995. Este trabajo precursor en el área constituye el primer aporte científico significativo a la resolución del problema. Según sus propios autores, la mayor contribución del artículo es haber formalizado la definición de un problema de escala industrial. El trabajo propone configurar una estructura de representación discreta del contenido de la tubería y de su evolución en el tiempo, para así encontrar un programa de bombeo y distribución eficiente de los productos, desde un origen único hacia múltiples terminales. La propuesta asume que los envíos se programan de acuerdo a un patrón **cíclico**, y que antes de resolver el problema ya se conoce la duración de cada ciclo, la cual ha sido ajustada convenientemente por el planificador teniendo en cuenta los requerimientos de los diferentes destinos. Tomando esta información como punto de partida, se describe un algoritmo de secuenciación de lotes que permite minimizar el número de puestas en marcha de las bombas en cada ciclo, con el fin de reducir los costos operativos del poliducto.

Aún bajo hipótesis que simplifican en forma considerable la descripción del problema de operación de las líneas, los autores demuestran que el problema es verdaderamente complejo. Para reducir el espacio de búsqueda, proponen un algoritmo de ramificación y acotamiento (“branch-and-bound”) que sumado a un procedimiento voraz (“greedy”) de generación de cotas, consigue soluciones óptimas, en tiempos razonables. El desafío más grande que se plantearon en aquel momento era extender el enfoque a poliductos con

más de un punto de inyección (“multiple-source”), aunque intuían que la tarea no sería sencilla.

Dos años más tarde, Sasikumar y colab. (1997) presentaron un modelo de resolución a partir de metodologías aproximadas de búsqueda local basadas en el conocimiento. La estrategia de mejora denominada “beam search” permite obtener planes mensuales de bombeo para un sistema de transporte que conecta una refinería con múltiples depósitos a lo largo de la línea. Si bien la heurística considera sólo un conjunto limitado de patrones de secuenciación y distribución de productos, el tamaño de los “batches” es una variable del problema, rompiendo con la idea primitiva de los programas cíclicos. El procedimiento tiene en cuenta la disponibilidad de combustibles en el origen del poliducto y los requerimientos de cada destino, al tiempo que monitorea los niveles de inventario en cada uno de los centros logísticos. Asimismo, incorpora restricciones de incompatibilidad de productos al secuenciar los lotes y contempla la combinación de despachos a través de otros medios, tales como trenes y camiones. El caso de estudio resuelto corresponde a una tubería de la India, que impulsa cuatro productos refinados hacia tres destinos a través de un poliducto simple.

La Aplicación de Técnicas Metaheurísticas

En el año 1999, Crane y colab. abordaron un problema sencillo consistente en programar el movimiento de combustibles a través de un poliducto simple, que distribuye dos especies distintas entre un origen único y ocho terminales. El objetivo fue minimizar la falta de stock (“shortage”) en los centros de demanda. Para su resolución, los autores plantearon un algoritmo genético como estrategia de búsqueda evolutiva de mejores soluciones. Del mismo modo, en los últimos años se han presentado nuevas técnicas de resolución aproximada basadas en metaheurísticas. Nguyen y Chan (2006) resolvieron el problema de programación de compresores en una red de distribución de gas natural por gasoductos. Mediante la aplicación de algoritmos genéticos y la configuración de redes neuronales, los autores lograron obtener buenas soluciones para la operación de los compresores dispuestos en cada línea. La técnica presentada considera los costos de parada y puesta en marcha de las unidades impulsoras, así como las restricciones en los niveles de presión del gas a lo largo de la tubería, según sea la demanda del combustible en los diferentes destinos.

El Aporte de la Simulación de Eventos Discretos

Paralelamente, el uso combinado de herramientas de simulación de eventos discretos ha permitido evaluar con mucha mayor rapidez y exactitud la calidad de las soluciones encontradas, agilizando en forma notoria el proceso de selección. En el año 1991, Camacho y colab. propusieron un primer esquema de resolución en dos pasos, utilizando reglas heurísticas y simulación. La incorporación de esta nueva herramienta les permitió abordar aspectos sofisticados, como la topología y topografía de la red de distribución, así como las condiciones no lineales que rigen el funcionamiento de bombas y tuberías. Haciendo uso de la condición de óptimo en problemas de programación dinámica, los autores aplicaron reglas heurísticas para hallar nuevas soluciones que lleven a reducir los costos energéticos involucrados en la operación de los ductos. Estas son luego testeadas utilizando el simulador de eventos discretos.

Más recientemente, García y colab. (2008) presentaron una herramienta de soporte a la toma de decisiones, que busca establecer un programa eficiente de transporte de combustibles a través de una red de poliductos interconectados. Se trata de un enfoque aproximado, que combina una técnica metaheurística clásica de mejoramiento de soluciones, denominada “tabú search”, con un modelo de simulación de eventos discretos del sistema. El procedimiento involucra múltiples objetivos de operación: (i) evitar el desabastecimiento de combustibles (“shortage”), (ii) minimizar los bloqueos de la línea por falta de capacidad de almacenamiento (“blockages”) y (iii) impedir interfases de productos incompatibles, entre los más importantes. Consiste en explorar alternativas a la solución actual, siempre dentro de un entorno acotado, y luego de “testearlas” en el simulador adoptar iterativamente aquélla que permite mejorar los criterios de evaluación. El algoritmo se detiene cuando todos los criterios alcanzan el valor deseado o estos no pueden mejorarse. La propuesta fue aplicada a la determinación del programa mensual de un poliducto, en un caso de estudio de la empresa CLH (España) que opera la totalidad de los ductos en ese país, y tiene como clientes a múltiples destilerías (Repsol y BP, entre otras).

Una ventaja significativa de los modelos de simulación corresponde al nivel de detalle con el que pueden representarse determinadas características operativas de los poliductos. Relaciones complejas, en general no-lineales, que determinan los perfiles de presión, las pérdidas de carga, así como la variación

del rendimiento mecánico de las bombas en función del caudal, se pueden describir a través de modelos detallados. A ello debe sumarse la posibilidad de analizar distintos escenarios, incorporando variables de comportamiento estocástico como la demanda, y tener en cuenta la ocurrencia de eventos inesperados. Al respecto, Cheng y Durán (2004) propusieron una herramienta para la toma de decisiones bajo incertidumbre que combina simulación con programación dinámica para coordinar las operaciones logísticas de una cadena global (“world-wide”) de abastecimiento de crudos por barcos y ductos. Mori y colab. (2007) usaron un modelo de simulación de eventos discretos para desarrollar el programa de operaciones detallado de una red real de poliductos que distribuye más de 10 especies a través de 15 líneas entre 3 refinerías, 1 puerto y 5 centros de distribución de la empresa Petrobras (Brasil).

En síntesis, el desarrollo de estrategias de solución basadas en el conocimiento se ha visto fuertemente favorecido por la asistencia de modelos de simulación que evalúan con un alto nivel de detalle la calidad de los programas de bombeo obtenidos. Sin embargo, se trata de técnicas de optimización para problemas sin restricciones, que evalúan la factibilidad de la nueva solución propuesta a través de su implementación en el módulo de simulación. En problemas fuertemente condicionados como el “scheduling” de operaciones de un poliducto resulta todavía muy difícil tan sólo encontrar una primera solución factible, que permita atender a tiempo las necesidades de todos los centros de demanda con el material disponible en el ducto y en cada refinería. Igualmente, si la solución de partida es de baja calidad, la generación de soluciones alternativas en un entorno acotado insume un tiempo considerable, y no aporta mayores beneficios a la optimización del programa de transporte. Este comportamiento errático es todavía más notorio cuando las variables de decisión a optimizar son continuas, tales como el volumen de los “batches” introducidos en la tubería, el caudal de inyección y los tiempos inicial y final de cada corrida de bombeo.

II.3.2.b Programación Matemática

En los últimos años, la programación matemática se ha convertido en una herramienta muy difundida para la generación de planes logísticos eficientes. Existen dos enfoques distintos según el tipo de representación que

se adopta para tratar los dominios de tiempo y espacio. Conforme al modo empleado, los modelos pueden clasificarse en:

A. *Discretos*

B. *Continuos*

En la programación de poliductos, los modelos discretos buscan dividir tanto el contenido volumétrico como el horizonte de planificación en fracciones de menor tamaño, para controlar los movimientos de material paso a paso, en cada elemento de tiempo del horizonte. En general, los modelos de representación logrados resultan de fácil comprensión, pero son aproximados y sus dimensiones crecen significativamente al elevarse el nivel de detalle. El número de variables discretas es sustancialmente alto, y el contenido de cada tramo o segmento de la tubería debe ceñirse a un valor aproximado. Más aún, el caudal de transporte por tramo debe ser único e invariable.

Los modelos continuos, en cambio, resultan en representaciones mucho más compactas, rigurosas y ajustadas al funcionamiento real del sistema, pero como contrapartida, poseen un nivel de desarrollo bastante más elaborado, que, en principio dificultaría su aplicación a configuraciones más complejas. A continuación se expondrán las propuestas más importantes publicadas hasta el momento en cada uno de estos grupos.

Modelos Discretos

Uno de los primeros trabajos publicados en la literatura internacional que recurre a la programación matemática para representar el problema de programación del transporte de crudos por ductos pertenece a Shah (1996). El caso involucra un puerto en el que se almacenan diversos tipos de crudos que arriban por barcos, y desde allí debe abastecerse a una única refinería a través de un oleoducto. La refinería posee diferentes unidades de destilación de crudos (CDU's) cuyos programas de producción deben ser establecidos conforme a las demandas a atender. Mediante una discretización uniforme del horizonte de tiempo y a partir de un programa matemático lineal mixto-entero (MILP) se propone resolver el problema de abastecimiento de crudos mediante una técnica de descomposición en dos instancias sucesivas. En primer lugar, el módulo "Downstream" busca conformar el programa de operaciones de cada unidad de destilación, procurando maximizar la utilización de la capacidad productiva. A partir de estos resultados, se obtiene el programa de bombeo del

oleoducto que permite aprovisionar a tiempo los volúmenes de crudos demandados, y se definen los tanques de la refinería asignados a cada tipo de crudo. Una vez establecido el patrón de envíos por ducto, se resuelve el bloque “Upstream” que utiliza un segundo modelo discreto buscando tan sólo una asignación de tanques factible, para almacenar en el puerto todos los crudos que arriban por barco, de acuerdo a un programa de transporte dado.

Representaciones Detalladas del Contenido del Ducto

Una propuesta más elaborada para la programación de ductos, que considera en detalle la evolución de su contenido en el tiempo, fue publicada por Rejowski y Pinto en el año 2003. Basándose en un modelo MILP expresado en término de disyunciones, que utiliza una representación discreta de la variable tiempo, los autores plantean dos casos: uno en el que dividen el volumen del poliducto en “packs” de tamaño uniforme, y otro en el cual, debido a una reducción en el diámetro de la tubería, los “packs” disminuyen su contenido volumétrico en el último tramo. A cada intervalo de tiempo, el contenido de un “pack” se desplaza hacia el elemento inmediato que lo sucede, siempre que el tramo esté activo o en movimiento. Cuando se trata del último “pack” dispuesto sobre el final de un segmento activo, debe determinarse además si el volumen se deriva a tanques de la terminal de recepción o se transfiere directamente hacia la próxima sección de tubería. En el primer caso, el tramo inmediato posterior permanecerá inactivo durante el “slot” de tiempo, mientras que en el segundo, será activado. Los intervalos de tiempo son fijos y de igual duración. En el ejemplo de la Figura II.5 el segmento de tubería d compuesto por cuatro “packs” se mantiene activo durante los períodos $T2$ y $T3$, facilitando el avance del lote de combustible $P2$ dos posiciones hacia delante, impulsado por el ingreso de $P1$ en el “pack” 1, en ambos períodos. Durante el “slot” $T2$, el tramo $d + 1$ también permanece activo, transfiriéndose un “pack” de $P1$ desde el segmento d hacia $d + 1$. Por el contrario, durante el “slot” $T3$, $d + 1$ se detiene, provocando la derivación de un “pack” de $P1$ hacia el depósito D .

En resumen, las decisiones más importantes involucradas en el modelo son: (i) la secuencia de “packs” de producto a inyectar en la línea (el volumen de cada “pack” se fija de antemano) y (ii) los tramos de tubería que permanecen activos en cada “slot” de tiempo. Ambos elementos definen la programación de las operaciones de carga y descarga que se producen tanto

en la refinería como en los tanques de cada terminal. El modelo considera la presencia de períodos de alto costo de energía eléctrica y restricciones de incompatibilidad de productos, entre otras. El objetivo que se persigue es minimizar la suma algebraica de los costos de bombeo de lotes, degradación de interfases y de mantenimiento del stock de combustibles en los tanques de cada terminal.

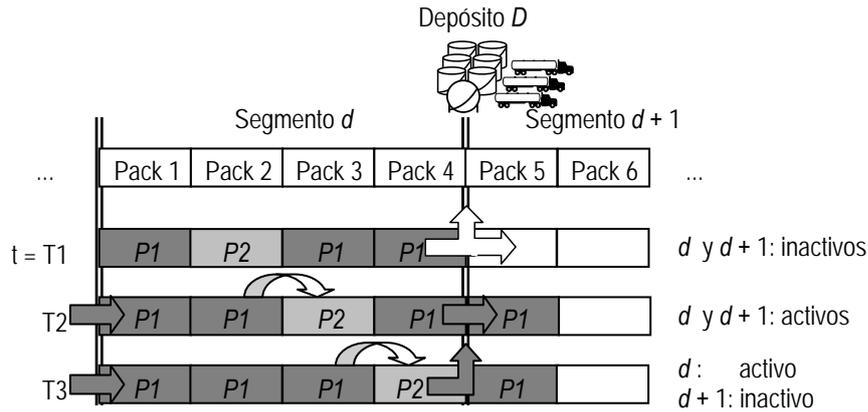


Figura II.5. Esquema Simple de Representación Discreta del Poliducto

El enfoque fue aplicado con éxito al “scheduling” de un poliducto real de la empresa Petrobras (Brasil), que transporta cuatro productos desde una única refinería a cinco terminales de distribución, en un trayecto de 955 km. El horizonte de tiempo se dividió en “slots” fijos de cinco horas, con una longitud total de sólo tres días, a pesar de que el transporte de combustible de un extremo al otro del poliducto toma más de una semana. Aun así, la resolución del problema es computacionalmente costosa, y en ciertos casos no es posible encontrar soluciones óptimas en el término de 10.000 segundos de CPU. Por otra parte, la discrepancia entre el volumen real de cada tramo y el que resulta del número entero de “packs” supera el 3,5%. En efecto, el contenido de cada tramo de tubería es de 39759, 25879, 25321, 59676 y 13739 m³, mientras que la representación discreta adopta capacidades aproximadas de 40000, 25000, 25000, 60000 y 13500 m³, respectivamente. Para los primeros cuatro segmentos, la discretización se realiza en “packs” de 5000 m³, pero en el último tramo (de menor sección) el volumen de los elementos se reduce a 2700 m³. El modelo asume que la transferencia de material desde el penúltimo al último tramo conlleva una derivación forzada

de 2300 m³ hacia el destino intermedio, reduciendo el caudal de transporte dentro del poliducto de menor diámetro.

En el año 2004, los mismos autores incorporaron al modelo original una serie de restricciones especiales y cortes enteros no intuitivos, con el objeto de minimizar la contaminación de combustibles dentro de la tubería y mejorar el desempeño computacional del modelo MILP. Lo cierto es que en ningún caso la resolución toma menos de 1000 segundos, y la longitud del horizonte de tiempo debe mantenerse acotada para limitar las dimensiones del modelo.

Con un criterio de representación similar, Magatão y colab. (2004) propusieron un procedimiento para desarrollar un buen “scheduling” de operaciones de un poliducto de 93,5 km de longitud, que opera en modo bidireccional. La tubería transporta múltiples combustibles entre un puerto y una refinería, en ambos sentidos, de acuerdo a las necesidades. La propuesta se basa en un enfoque MILP con discretización uniforme del horizonte de tiempo, y utiliza una estrategia de descomposición para evitar el crecimiento abrupto de los tiempos de resolución. Consta de dos modelos MILP y una rutina auxiliar de restricciones de tiempo, asistidos por una base de datos común. Al objetivo habitual de reducir el consumo de energía en función de la franja horaria, se suma la necesidad de minimizar la utilización de material de separación, normalmente denominado “plug” o tapón. Estos pequeños lotes de producto se introducen en la línea para evitar el contacto entre especies incompatibles que deben necesariamente transportarse en “batches” sucesivos. El trabajo muestra que al incrementarse el nivel de detalle de la discretización (“slots” de una hora), para horizontes de planificación de hasta cinco días, los tiempos de resolución crecen considerablemente.

El diagrama de la Figura II.6 representa el programa de operaciones del poliducto bidireccional a lo largo de los 24 intervalos de tiempo que componen el horizonte. Inicialmente, el sistema contiene un producto de “relleno” (PND) y durante la primera mitad del horizonte opera en flujo reverso (puerto-refinería). Para hacer llegar los productos requeridos por la refinería (*P1*, *P2*, *P3* y *P4*) debe introducirse un enorme lote de “barrido” (GAP), que en la segunda mitad del programa retorna a los tanques del puerto. Asimismo, una vez invertido el flujo e inyectados los productos refinados *P5*, *P6*, *P7* y *P8*, que se transportan en sentido directo (refinería-puerto) se vuelve a utilizar un último “batch” de relleno, que completa el volumen de la tubería al finalizar el

plan de operaciones (END). La necesidad de impulsar lotes de “relleno” o “barrido”, con productos que no forman parte de la demanda de ambos nodos, demuestra la ineficiencia de las operaciones en poliductos bidireccionales. No obstante, cuando la extensión de la tubería es acotada y la inversión del flujo no es demasiado frecuente, su uso puede resultar provechoso.

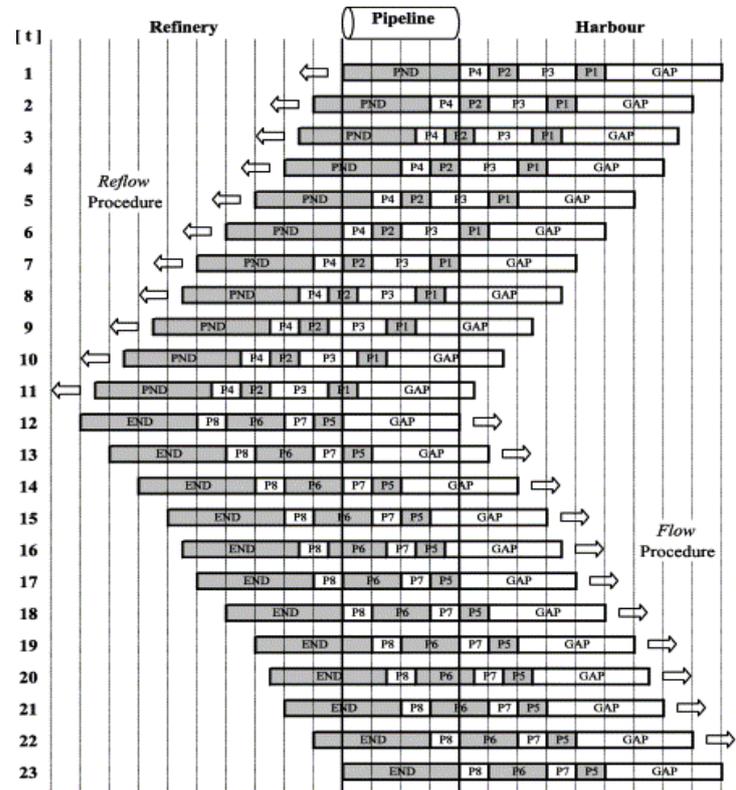


Figura II.6. Programa de Transporte de un Poliducto Bidireccional (Magatão y colab., 2004)

Más recientemente, Zyngier y Kelly (2006) publicaron un modelo general para la representación de poliductos y otros sistemas de transporte e inventario multi-producto, en industrias de proceso. El abordaje de la problemática se orienta al desarrollo de modelos matemáticos MILP, con discretización uniforme de las escalas de tiempo y volumen. A diferencia de las representaciones publicadas con anterioridad, el esquema permitiría modelar poliductos con más de un único punto de inyección de combustibles a lo largo de la línea, aunque no se han resuelto casos de estudio significativos para evaluar la efectividad de la formulación.

Otros Enfoques

Con el afán de vincular dos instancias sucesivas del proceso de planificación de las cadenas de suministro, Van den Heever y Grossmann (2003) propusieron una estrategia de integración del plan de producción con el “scheduling” o programación detallada de las operaciones en una red de abastecimiento de hidrógeno a través de tuberías. En un primer modelo MINLP multiperíodo se resuelve el patrón de alimentación de hidrógeno desde cada una de las plantas que integran la red, para un horizonte mensual dividido en períodos de 12 horas. En este caso, se tienen en cuenta funciones complejas de costo pero a partir de una representación muy simplificada de los ductos. Una vez establecida la política de abastecimiento en función de la matriz de precios, un segundo modelo MINLP contempla en forma detallada las características fluido-dinámicas del sistema de distribución. Se determina así el modo más conveniente de operar las unidades de compresión y atender las demandas de los centros de consumo, en un horizonte de medio día de longitud, compuesto por 12 períodos de una hora. Los autores proponen además un horizonte rodante de programación, en un entorno de condiciones cambiantes, lo cual requiere la modificación del “schedule” inicial a través de técnicas “reactivas”. Sin embargo, claro está, se trata de ductos que transportan una única especie.

Modelos Continuos

El otro grupo importante de metodologías para la programación del transporte por poliductos aplican un enfoque continuo. Los modelos de representación continua no recurren a la discretización de la escala temporal, y aquéllos aun más elaborados, ni siquiera dividen el contenido volumétrico del poliducto en “packs” de igual o distinto tamaño. Más aún, permiten establecer en forma óptima la secuencia de inyección de combustibles, el tamaño de los “batches”, el caudal de bombeo, los tiempos de inicio y culminación de cada una de las ejecuciones, el volumen de interfases a reprocesar, y las cantidades y tipos de productos descargados a tanques durante cada corrida de bombeo. Simultáneamente, son capaces de hacer un seguimiento preciso de la localización de los lotes que se trasladan dentro de la tubería, así como de los inventarios de combustible en tanques de origen y destino. Dentro de este grupo se engloban los modelos que se desarrollan a lo

largo de esta tesis. En particular, la primera formulación continua propuesta en la literatura para la programación de un poliducto simple que conecta una refinería con múltiples destinos fue publicada por Cafaro y Cerdá en el año 2004, y se presenta en forma detallada en el Capítulo IV de este trabajo.

Por otro lado, Reddy y colab. (2004) presentaron una formulación matemática mixta-entera no-lineal (MINLP) para la programación de las operaciones de suministro y procesamiento de crudos en una refinería con múltiples unidades de destilación (CDU's). Los diferentes tipos de crudo se abastecen por barcos, que descargan directamente en los tanques de la refinería a través de una boya simple de amarre (SBM) y un oleoducto de pequeñas dimensiones. Los autores proponen un algoritmo de resolución aproximado que resuelve sucesivos programas MILP para encontrar una solución de buena calidad, en tiempos razonables. Si bien se adopta una representación de tiempo continuo, mediante "slots" de dimensiones variables, no se analiza en detalle la evolución del contenido del ducto, pues su volumen representa no más del 5% del tamaño típico de un lote de crudo. Una vez más, los resultados muestran la eficiencia de las representaciones de tiempo continuo frente a las representaciones discretas, en horizontes de hasta siete días.

Extensiones del Modelo Original

Basándose en el modelo continuo propuesto por Cafaro y Cerdá (2004) y presentado en esta tesis en el Capítulo IV, Relvas y colab. (2006) estudiaron la programación del transporte en un poliducto real de la empresa CLC (Portugal) que abastece a un centro de distribución de combustibles desde una única refinería. La terminal de destino consiste en una granja de tanques ("tank-farm") cada uno de los cuales está asignado al almacenamiento de un producto específico. En particular, los autores han aportado a la literatura existente un desarrollo enfocado en las operaciones habituales de la terminal de cargas. En trabajos previos, la dinámica interna propia de las terminales de distribución era contemplada en forma parcial. Sin embargo, los estrictos procedimientos de control de calidad pueden afectar significativamente la gestión de inventarios en las terminales del poliducto. Concretamente, existen en la práctica períodos de retención denominados "settling periods", durante los cuales cada "batch" de producto debe permanecer en el tanque asignado hasta tanto se completen las tareas de control y aprobación del lote. Estos

tiempos de retención comienzan en el mismo momento en que el lote abandona el poliducto. Otro punto importante del enfoque consiste en la información más detallada de la demanda, la cual se presenta en un patrón diario. En estudios anteriores, los requerimientos de producto se consideraban pactados hacia el final del horizonte, o concentrados en pocas “due-dates” (Cafaro y Cerdá, 2008b). Por el contrario, Relvas y colab. asumen que el operador de la línea conoce de antemano la demanda de combustibles para cada uno de los días que componen el horizonte mensual de programación.

Por otro lado, las metodologías más comunes para la programación de ductos suelen evaluar la disponibilidad de almacenamiento en forma agregada, no entrando en detalle en la utilización particular de cada tanque. En el modelo presentado por Relvas y colab. (2006), este aspecto se trata con un grado de especificidad mayor. Con el fin de que los “batches” de combustible completen en su totalidad uno o más tanques de la terminal, el tamaño de los lotes debe ajustarse a determinados valores, en lugar de tomar un volumen positivo cualquiera. Teniendo en cuenta que se dispone de un número limitado de tanques para cada producto, y que algunos de ellos contienen lotes en período de “settling”, puede ocurrir que la terminal no posea capacidad para almacenar un “batch” que arribe en un dado momento, y la operación del poliducto deba detenerse. Otra contribución del trabajo es la búsqueda de objetivos operacionales tales como la maximización del uso del poliducto y los niveles finales de combustible en los tanques de la terminal. Se resolvieron ejemplos con secuencias de productos fijas o semi-definidas, en tiempos de CPU razonables. Sin embargo, el modelo se torna extremadamente grande al abordar la elección de la secuencia completa de productos más conveniente. En esos casos, no es posible encontrar la solución óptima aun después de dos horas de CPU. Además, los inventarios finales de productos difícilmente coinciden con los perfiles de demanda futura. En consecuencia, podría no existir solución factible para el próximo horizonte de planificación.

En una publicación posterior, los mismos investigadores (Relvas y colab., 2007) extendieron su propuesta original con el objeto de incluir tres nuevas características: (i) tiempos de “settling” diferenciados para cada tipo de producto, (ii) caudales de bombeo variables y (iii) detenciones momentáneas de la línea. Asimismo, estudiaron la reprogramación o “rescheduling” del sistema ante la ocurrencia de eventos inesperados a lo largo del horizonte (cambios en el perfil de demanda, permutas en la secuencia de inyección, detenciones de la

línea por fallas y reducción en la capacidad de acopio por tareas de mantenimiento en tanques). Tal como se ha expresado, la incertidumbre es una condición inevitable en la operatoria habitual de las cadenas de suministro actuales, y la dinámica propia de estos sistemas torna indispensable la flexibilización del programa de operaciones.

Finalmente, buscando dar solución al programa de transporte simultáneo de múltiples poliductos que interconectan nodos logísticos entre sí, Neves y colab. (2007) presentaron los resultados de una metodología híbrida que combina herramientas heurísticas con formulaciones matemáticas MILP de tipo continuo. El enfoque por descomposición consiste en un módulo de pre-procesamiento que selecciona la secuencia de inyección de productos dentro de un rango limitado de variantes, los tamaños de “batches” típicos, así como las ventanas de tiempo para el arribo de cada lote a su propio destino. En un segundo bloque, un programa MILP establece la agenda de corto plazo que permite minimizar los costos de energía en función del escenario de producción/consumo y el stock de combustible presente en cada una de las terminales de la red.

Los Últimos Avances

Recientemente, Rejowski y Pinto (2008) optaron por una representación de tiempo continuo para la programación de operaciones en una línea que distribuye combustibles desde una única refinería a múltiples terminales. No obstante, el modelo MINLP propuesto se plantea para un horizonte de planificación estático, y aún recurre a la discretización del volumen del poliducto, ajustando cada tramo a un número entero de “packs”. Estos elementos de volumen pueden sufrir variaciones de un segmento al otro, en caso que se presenten reducciones en el diámetro de la tubería principal. Sin embargo, aún utiliza un enfoque discreto para controlar la dimensión de los lotes, el movimiento de los productos a lo largo de la línea y las operaciones de descarga en cada terminal de distribución. En lo que respecta a la escala de tiempo, el horizonte se divide en un número arbitrario de “slots” de dimensión variable, que permite adoptar para cada ejecución un caudal de bombeo conveniente. Comparado con representaciones discretas publicadas por los mismos autores, el modelo reduce sensiblemente sus dimensiones.

La formulación tiene en cuenta además la influencia de los caudales de transporte en los costos de operación de las unidades de bombeo. Las

estaciones elevadoras (“booster stations”) aportan la energía necesaria para el flujo de los combustibles dentro de la tubería, y se componen generalmente de bombas centrífugas conectadas en diferentes configuraciones (serie, paralelo o mixtas). Si se evalúa el rendimiento de las estaciones de bombeo en función del caudal de operación, es posible encontrar condiciones óptimas para la velocidad del flujo dentro de las tuberías. El modelo MINLP fue aplicado a la programación operativa del poliducto São Paulo – Brasilia (Petrobras, Brasil) presentado anteriormente, extendido ahora a un horizonte temporal de 130 horas. A pesar de que el costo computacional se reduce en forma notoria respecto de representaciones discretas puras, el tiempo de resolución es todavía elevado considerando un horizonte de tiempo tan acotado.

Por último, se han reportado formulaciones continuas en el tiempo y espacio para la programación dinámica de poliductos sobre horizontes móviles multi-período. Cuando culmina la fase actual de operación, el horizonte de tiempo avanza un período y el proceso de reprogramación se resuelve nuevamente con información actualizada del problema. Los modelos dinámicos fueron introducidos por Cafaro y Cerdá (2008b) y se presentan en detalle hacia el final del Capítulo IV de esta tesis.

II.4 Resumen

Establecer un programa de operaciones factible para el transporte de combustibles a través de poliductos no es una tarea sencilla para ninguna compañía petrolera del mundo. Ni siquiera al abordar tuberías con origen y destino únicos. Más complejo aún resulta hallar secuencias de bombeo óptimas, que permitan minimizar los costos logísticos asociados al funcionamiento de estas líneas. La literatura publicada hasta el momento en el área es realmente escasa. Tanto es así que muchas empresas operadoras de poliductos continúan hoy en día diagramando sus planes basados en patrones cíclicos, una regla primitiva que ha subsistido durante más de cincuenta años. La dinámica particular de los mercados de combustibles actuales exige la aplicación de técnicas de programación más avanzadas.

Las primeras metodologías elaboradas para la resolución de este problema se publicaron recién en la última década. Los enfoques basados en el conocimiento, que proponen reglas heurísticas para la búsqueda de mejores soluciones, se han visto favorecidos por el aporte de herramientas como la

simulación de eventos discretos. Estos procedimientos computacionales se han vuelto muy populares, pues permiten evaluar en forma rápida características no-lineales de los sistemas de transporte por tuberías. Asimismo, el uso de técnicas aproximadas puede extenderse a configuraciones más complejas, como las líneas con múltiples puntos de inyección. Sin embargo, los resultados hacen pensar que de no partir de una buena solución, los métodos de búsqueda local pueden tornarse extremadamente erráticos.

Los modelos de programación matemática aparecen como la alternativa más conveniente para encontrar soluciones óptimas en la distribución de combustibles por poliductos. Por un lado, las representaciones discretas han logrado replicar en una estructura simple el funcionamiento de las líneas de distribución, con movimientos “paso-a-paso” que permiten controlar en el tiempo las variables de interés del problema. No obstante, estos esquemas carecen de rigurosidad, y presentan un elevado número de variables y restricciones que crecen significativamente con el nivel de detalle de la discretización. Como resultado, el horizonte del plan debe mantenerse acotado a unos pocos días de operación.

El desarrollo de un enfoque continuo para representar el seguimiento de los lotes de combustible en el tiempo ha sido un aporte significativo. Su aplicación permite reducir sensiblemente las dimensiones del modelo, con estructuras mucho más ajustadas al funcionamiento real y para horizontes de hasta un mes de duración. El desafío más grande que se enfrenta por estos días es extender el concepto a poliductos troncales, de uso compartido por varias compañías, que transportan combustibles desde diversas refinerías hacia centros de distribución próximos a los mercados de consumo. A lo largo de esta tesis se describirán las características principales de una formulación continua robusta aplicada a diferentes configuraciones, para finalmente introducir la representación de un sistema de transporte con múltiples ductos coordinados, que conectan refinerías y puntos de inyección con terminales y centros de distribución, un problema aún no tratado en forma rigurosa por los investigadores del área.

Capítulo III

Planeación del Transporte por
Poliductos con un Único
Origen y un Único Destino

III.1 Introducción

El problema de planeación del transporte por poliductos se ha enfocado especialmente a líneas de transmisión, que poseen dimensiones considerables y un grado de complejidad mayor a la hora de coordinar sus operaciones. La principal dificultad radica en los enormes volúmenes contenidos dentro de la tubería, y la lentitud del transporte, con “lead-times” o tiempos de entrega de hasta una semana.

Una tubería troncal tipo, de 20” de diámetro y 500 km de longitud, contiene un total de más de 100000 m³, un volumen que equivale a la capacidad de varios tanques de almacenamiento. Dado que los poliductos permanecen llenos de combustibles en todo momento, el interior de una línea de transmisión está comúnmente ocupado por diversos “batches” que marchan en forma secuencial, uno detrás de otro, tal como se explicara en el primer capítulo del presente trabajo. Por otra parte, un caudal de transporte característico en estas líneas puede oscilar en torno a los 1000 m³/h. Como resultado, cada unidad de combustible impulsada desde el origen o cabecera tardará 100 horas (más de 4 días) en alcanzar su destino. Esto es, una velocidad lineal promedio de tan sólo 5 km/h.

Para ilustrar la complejidad de la planeación de operaciones en estos sistemas, supongamos que la línea antes descrita contiene diesel y nafta en dos lotes contiguos de iguales dimensiones (50000 m³ cada uno), estando el lote de nafta en la primera mitad de la tubería, más próxima a la refinería (ver Figura III.1). En ese momento, la terminal de destino recibe una orden de entrega de JP1 (combustible de propulsión jet para aviones), que no puede atender con el stock disponible en tanques. De este modo, se presentan al menos tres serios inconvenientes:

- (1) Por incompatibilidad de las especies, algunas compañías de refino evitan poner en contacto combustibles como nafta y JP1. El reprocesamiento de la interfase generada suele ser muy costoso. Dado que el último lote introducido por la refinería contiene nafta, no es posible inyectar de inmediato el lote de JP1 demandado, sin antes introducir un lote mínimo de combustible compatible con ambas especies (por ejemplo kerosene), que haga las veces de “tapón” separador o “plug”. Esto provoca un inevitable retraso en el aprovisionamiento.

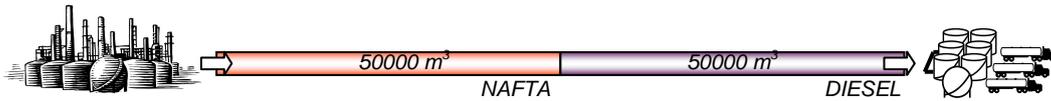


Figura III.1. Transporte Secuencial de Combustibles por Poliductos

- (2) Aún así, el lote de JP1 tardará más de 4 días en alcanzar el destino, un tiempo excesivo para las condiciones que exigen los sistemas logísticos actuales. ¿Podría imaginar el lector un aeropuerto inoperable durante algunos días por la falta de combustible para los aviones? Obviamente, en ese caso deberá recurrirse a medios de transporte alternativos, como los camiones, que como contrapartida insumen un costo unitario hasta 15 veces más alto.
- (3) Por último, debe definirse dónde disponer los lotes de nafta y diesel que transitan por el ducto. Si los tanques con los que cuenta la terminal de distribución estuviesen parcialmente ocupados, y la capacidad de almacenamiento remanente fuera insuficiente, el avance del lote de JP1 se vería retrasado hasta tanto se libere la capacidad necesaria para recibir esos lotes.

En resumen, todos estos problemas se habrían evitado si se contara dentro de la tubería con un lote de JP1 próximo a la terminal de destino. Para ello, el planificador de la línea debería haber dispuesto la inyección de JP1 cuatro días antes que el centro de distribución agotase su stock, y verificado la disponibilidad de tanques de almacenamiento para retirar los lotes que lo anteceden en la línea. No obstante, debe poner especial cuidado en no introducir lotes demasiado pequeños que lleven a políticas costosas en cuanto a la degradación de combustibles por interfases. He aquí la importancia fundamental de la planificación de operaciones en poliductos troncales, aún con origen y destino únicos.

Dimensionamiento de los Lotes de Combustible (“Batching”)

El proceso asociado al dimensionamiento de los lotes o “batches” de combustible a transportar por el poliducto es una operación clave para la distribución eficiente de los productos refinados. Un “batch” es un volumen de producto perfectamente identificable, que se transporta a través de la línea

como un bloque compacto, en un movimiento turbulento que se aproxima al flujo pistón ideal.

El transporte secuencial de “batches” de distintos combustibles hace que puedan atenderse los requerimientos diarios de productos en los grandes centros de demanda a través de una misma tubería, en lugar de utilizar un conducto diferente para cada especie. Para optimizar las operaciones, el planificador de la línea establece cuidadosamente la secuencia de productos y el tamaño de los lotes que minimiza la degradación de combustibles por interfases y maximiza el cumplimiento de las demandas de los clientes. Las exigencias cada vez mayores impuestas sobre la calidad de los combustibles, y la consecuente proliferación de especies transportadas, condujeron a una división más fina de los lotes, incrementando el número de transiciones y los volúmenes de combustibles degradados o contaminados. Si los productos puestos en contacto son similares (por ejemplo, naftas regular y prémium) la mezcla resultante se adiciona al producto de menor grado. Por el contrario, si se trata de productos disímiles (por ejemplo, nafta y LPG –Gas Licuado de Petróleo–) el producto-mezcla, denominado “transmix”, debe enviarse a tanques de segregación y luego ser reprocesado.

En el desarrollo de este capítulo se presentarán las bases de un modelo de representación de poliductos troncales con origen y destino únicos, enteramente continuo en las escalas de tiempo y longitud. En las primeras secciones se abordará la planeación del transporte buscando optimizar la secuencia de corridas de bombeo y los volúmenes de combustibles a inyectar desde la refinería. Posteriormente, se irán incorporando aristas de mayor complejidad, fundamentalmente enfocadas en la gestión eficiente de los tanques de almacenamiento disponibles en la terminal de destino. Asimismo, se contemplarán características propias del perfil de demanda de combustibles, que permitirán resolver un caso de estudio real de la industria petrolera, en tiempos computacionales muy razonables.

III.2 Definición del Problema

El problema más elemental de planeación de poliductos troncales consiste en:

- (a) Una tubería simple que conecta una refinería o estación cabecera con una única terminal de distribución o destino (ver Figura III.2).
- (b) El conjunto de combustibles y productos refinados, en general en estado líquido, a transportar en forma secuencial a través de la misma línea.
- (c) Las transiciones entre dos envíos sucesivos de productos distintos, prohibidas por incompatibilidad de las especies transportadas.
- (d) Las demandas diarias de productos a atender por la terminal de distribución.
- (e) La capacidad de almacenamiento disponible para cada producto en la terminal de distribución, en función de los tanques asignados a cada uno de los combustibles.
- (f) Las condiciones iniciales del poliducto (la secuencia de productos dentro de la línea a tiempo “cero”, y el volumen inicial de cada envío).
- (g) El stock inicial de combustibles en los tanques del centro de distribución.
- (h) El número máximo de lotes a inyectar en la línea desde la refinería, durante el horizonte de planeación abordado.
- (i) El caudal de inyección y transporte de cada uno de los productos.

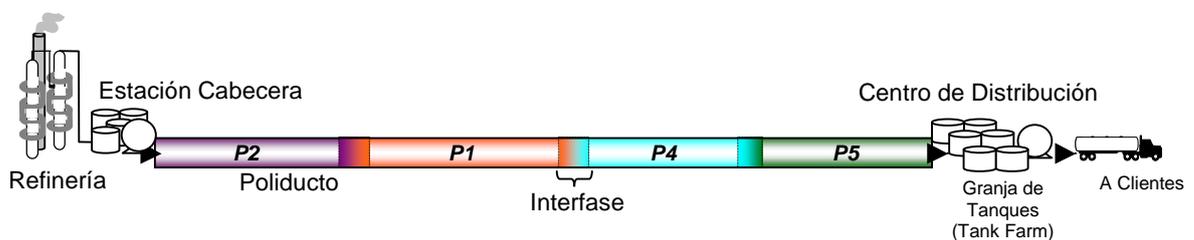


Figura III.2. Poliducto Troncal con Origen y Destino Únicos

Basándose en las condiciones de operación del sistema de transporte, el objetivo del problema consiste en establecer:

- (1) La secuencia de productos a inyectar desde la refinería.
- (2) El tamaño de los envíos o “batches” de combustible, así como los tiempos de inicio y finalización de cada “corrida” de bombeo.
- (3) Las cantidades y tipos de productos que arriban a la terminal del sistema durante cada corrida, para ser almacenados en tanques preasignados.
- (4) El stock de productos en tanques de la estación terminal al término de cada corrida y su evolución día a día, teniendo en cuenta los nuevos arribos desde el poliducto y los despachos al mercado por medio de camiones cisterna.

III.3 Modelo de Representación

III.3.1 Consideraciones Generales

El modelo que se desarrolla a lo largo de este capítulo responde a una rigurosa formulación matemática que contempla las restricciones operativas más importantes en la planificación de estos sistemas de transporte. No obstante, una de las premisas que se ha impuesto en su elaboración es mantener una estructura algebraica simple, con variables continuas y discretas que conserven, en lo posible, relaciones lineales, para facilitar su resolución. Una vez establecida la función objetivo que mejor se ajusta a los criterios evaluados por el operador de la línea y modeladas las restricciones del problema, haciendo uso de los algoritmos disponibles, se podrá resolver el programa matemático lineal mixto-entero (MILP) resultante para determinar el valor óptimo que han de asumir las diferentes variables, a los efectos de minimizar o maximizar el cúmulo de objetivos operacionales planteados.

Si bien en los últimos años se han logrado avances importantes en la resolución de programas matemáticos no lineales, las metodologías propuestas adolecen de serias complicaciones, sobre todo si el punto de inicialización del algoritmo es deficiente. En problemas no-convexos, la complejidad que plantea el sortear los puntos estacionarios locales en pos de encontrar el óptimo global del problema demanda enormes tiempos computacionales que limitan la aplicación de estas técnicas a casos de estudio relativamente pequeños.

Por el contrario, los algoritmos de resolución de programas mixto-enteros lineales han evolucionado en forma notable, y a diferencia de los anteriores pueden extenderse a problemáticas reales de mayores dimensiones. Asimismo, son capaces de asegurar las condiciones de operación óptimas, desde que las estrategias de búsqueda aplicadas garantizan el “barrido” implícito de la región factible del problema. En efecto, se plantea y refina una cota inferior para la función objetivo a lo largo de todo el procedimiento que permite conocer cuánto dista la última solución entera hallada del mejor valor posible. La distancia o “gap” entre ambos valores se reduce con el correr del tiempo, hasta tanto se alcanza un valor “aceptable”, de acuerdo con las exigencias del programador. Dividiendo el “gap” por la cota inferior, se obtiene la llamada tolerancia o “gap” relativo de la solución actual.

III.3.2 Hipótesis de Trabajo

Para el desarrollo del modelo matemático que representa el funcionamiento de un sistema de transporte por tuberías con origen y destino únicos, se han asumido como válidas las siguientes hipótesis de trabajo:

- (1) El poliducto consiste en una tubería simple con flujo unidireccional.
- (2) La línea transporta combustibles líquidos incompresibles que llenan todo el interior del conducto. La única forma de obtener un volumen de producto fuera de la línea en la terminal de destino es mediante la inyección de un volumen equivalente en el origen del sistema.
- (3) La transmisión del momento o cantidad de movimiento a cada unidad de volumen transportado se supone instantánea, y el movimiento de los lotes se considera ideal, en flujo pistón. En esta instancia de la planeación de operaciones, el comportamiento detallado del flujo dentro de la tubería suele simplificarse, sin perder generalidad. El objetivo es concentrar todos los esfuerzos en optimizar la dimensión y la secuencia de los lotes de combustibles, así como el plan de abastecimiento a la terminal de destino. En una etapa posterior, se configuran las operaciones en las estaciones de bombeo, y se establecen las condiciones fluidodinámicas más convenientes para operar el sistema de transporte, abordando en detalle cuestiones inherentes a la evolución del flujo de los combustibles dentro del conducto.

- (4) Los lotes o “batches” de combustible se introducen en el poliducto en forma secuencial, uno después del otro, sin dispositivos físicos de separación. En la práctica, se desplazan en flujo turbulento para minimizar la contaminación en las interfases.
- (5) El volumen de producto-mezcla generado en la interfase entre dos lotes sucesivos que contienen productos distintos se supone constante, independiente del caudal de transporte y de las detenciones de la línea.
- (6) Cada “batch” se impulsa dentro de la tubería con un caudal fijo, que depende del producto inyectado.
- (7) El centro de distribución que recibe los “batches” de combustible provenientes del poliducto consiste en una granja de tanques con unidades de almacenamiento de capacidad conocida, cada una de las cuales ha sido asignada a un producto específico.
- (8) Como máximo uno de los tanques de la terminal de destino está conectado al poliducto durante la operación de descarga, y el tiempo de transición para concretar el recambio del tanque receptor es despreciable. Sin embargo, pueden existir tiempos muertos asociados al accionamiento de válvulas, bombas y otros dispositivos, entre dos corridas de bombeo consecutivas.
- (9) Las demandas diarias de cada uno de los productos se conocen de antemano, para cada uno de los días que componen el horizonte de planificación.
- (10) El programa de producción en la refinería ya ha sido establecido, basado en las demandas diarias que se proyectan en el centro de distribución. Esto es así dado que dicho centro constituye el destino principal de la mayor parte de los combustibles refinados. En consecuencia, no hay necesidad de monitorear el stock de productos en los tanques de la refinería o estación cabecera.
- (11) Las demandas diarias de combustible deben atenderse antes de la finalización de cada día. Para ello, solo puede utilizarse el material de los lotes que se han descargado por completo de la tubería, y no de aquellos que lo han hecho en forma parcial. Ello es así porque se

debe realizar el control de calidad sobre cada lote una vez que se ha descargado en su totalidad.

- (12) Por tareas de mantenimiento preventivo en la línea de transporte, pueden presentarse periodos de detención, cuyos tiempos de inicio y finalización son conocidos de antemano. Durante estos intervalos de tiempo, los lotes de combustible deben permanecer en reposo, y las unidades de impulsión fuera de servicio.

III.3.3 Elementos Principales del Modelo

La estructura principal del modelo de representación del problema está basada en el manejo continuo de las escalas de longitud y tiempo. En el desarrollo de esta sección se presentarán los conjuntos e índices más importantes que forman parte del modelo, y se verá el modo en que se articulan entre sí para reproducir el funcionamiento real de un sistema de transporte por tuberías.

Conjunto de Envíos, “Batches” o Lotes Transportados

Una de las características distintivas del transporte por poliductos es que el interior del sistema permanece lleno de productos líquidos en todo momento. Además, las unidades de transporte (lotes o “batches” de combustible) se introducen en forma secuencial dentro de la misma línea, por lo que el control del movimiento de los envíos es particularmente distinto al transporte por camiones, barcos o trenes. Suponiendo que el volumen de la interfase entre dos lotes sucesivos es despreciable frente al tamaño de cada “batch”, la disposición de los envíos dentro de la línea se asemeja a un tren de lotes (“batch train”), cada uno de los cuales constituye un vagón de una formación que ocupa todo el recorrido del poliducto.

Partiendo de esta idea elemental, puede definirse el conjunto genérico de “batches” o lotes de combustible impulsados a través del poliducto:

$$I = \{i_1, i_2, i_3, i_4, \dots, i_n\}$$

donde el término “genérico” indica que aún no se ha establecido el producto que contienen.

Para facilitar el seguimiento de los combustibles, los elementos del conjunto de lotes están ordenados de la misma forma en que se inyectan y se transportan dentro de la tubería. En otras palabras, el lote i_l es el primero que

ha sido bombeado y se desplaza en la primera posición del tren de envíos, seguido por el lote i_2 , que a su vez se mueve delante del lote i_3 , y así sucesivamente (ver Figura III.3).

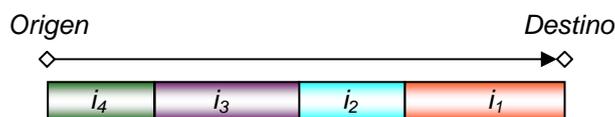


Figura III.3. Disposición Secuencial de Lotes dentro del Poliducto

Por otra parte, es importante distinguir aquellos lotes que se encuentran en el interior del poliducto al momento de planificar las operaciones de transporte (tiempo $t = 0$). A este subconjunto de lotes, de producto y volumen ya establecidos, se lo denominará:

$$I^{old} = \{i_1, i_2, \dots, i_q\}$$

Estos lotes constituyen los primeros “ q ” elementos del conjunto I , y tal como se propusiera, están ordenados del mismo modo en que transitan a través de la tubería. En efecto, i_q es el último “batch” inyectado en el origen de la línea durante el horizonte previo, antes de abordar el nuevo horizonte de planificación. Si bien está predeterminado el tipo de combustible que transportan, su contenido puede ir variando en el tiempo, en la medida que alcancen su destino y sean depositados en los tanques de la estación terminal.

Los elementos restantes del conjunto I representan nuevos “batches” a inyectar durante el horizonte actual, y su contenido se desconoce de antemano. Será tarea del planificador de la línea determinar el producto asignado a cada nuevo lote, el volumen impulsado y la evolución de su posición en el tiempo.

$$I^{new} = \{i_{q+1}, i_{q+2}, \dots, i_n\}$$

Una de las cuestiones que surgen naturalmente en la definición de este último subconjunto es cuál será el número necesario de nuevos lotes para conformar el programa de transporte óptimo. A los efectos de no incrementar las dimensiones del modelo matemático, el número de nuevos lotes debería mantenerse lo más reducido posible, aunque lo suficientemente grande como para alcanzar el valor óptimo de la función objetivo. A lo largo de todo el trabajo, se comenzará proponiendo un número inicial de nuevos lotes, que surge de analizar tres parámetros característicos del problema: (i) la cantidad

de productos a transportar, (ii) el tamaño promedio de los lotes de cada combustible, y (iii) el volumen total demandado en la terminal del poliducto. Una vez resuelta la primera instancia del modelo de programación MILP, el número de nuevos lotes se incrementa en uno, y se vuelve a resolver. Así sucesivamente, hasta que no se observen mejoras en el valor óptimo de la función objetivo (ver Figura III.4). En resumen, la clave del problema consiste en obtener un valor inicial apropiado para el número de nuevos “batches” a impulsar dentro de la tubería. Al abordar cada uno de los casos de estudio del presente trabajo, se indicará el modo en que se obtiene el número óptimo de nuevos lotes de combustible.

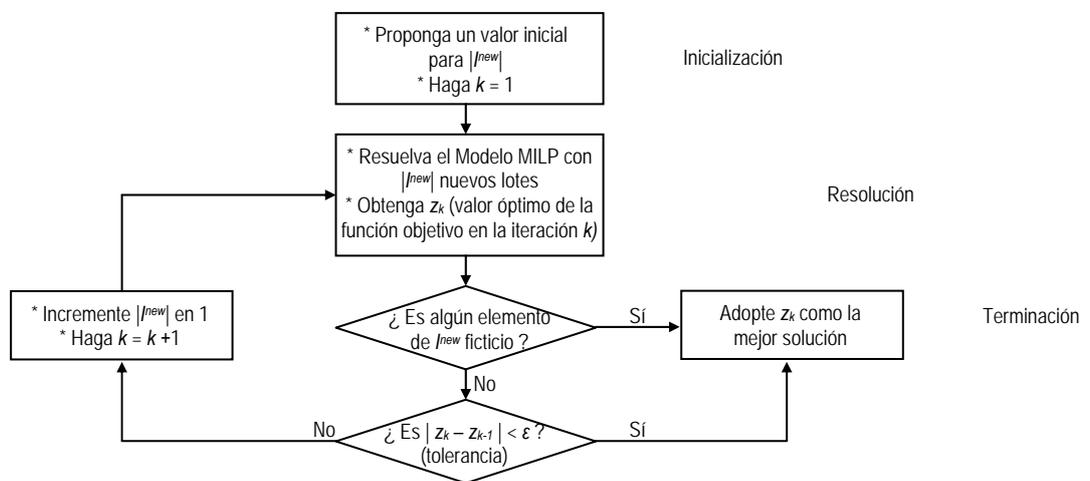


Figura III.4. Procedimiento Iterativo de Selección de $|I^{new}|$

Conjunto de Nuevas Corridas de Bombeo

Seguidamente, otro de los conjuntos principales del modelo corresponde a la sucesión de corridas de bombeo o ejecuciones del plan de transporte, cuyo inicio y finalización son eventos desconocidos de antemano, y constituyen variables no negativas de la formulación. Claro está que la única forma de inducir el transporte de los combustibles a lo largo del poliducto es mediante la inyección de nuevos envíos en la estación cabecera. Estos irán desplazando aguas abajo a los lotes inyectados previamente, mientras que, al mismo tiempo, los más adelantados serán transferidos a los tanques de la terminal de destino.

A partir de este concepto fundamental del transporte por tuberías, puede desprenderse una correspondencia biunívoca entre los nuevos lotes de

combustible introducidos en la tubería y el conjunto de nuevas ejecuciones del plan. Dicho de otro modo, en cada ejecución o corrida de bombeo del plan de transporte ha de introducirse un nuevo “batch” de combustible, distinto a todos los demás, y en forma recíproca, cada nuevo lote de combustible a introducir en la línea requiere de una corrida de bombeo propia para iniciar su impulsión.

En resumen, el mismo conjunto de nuevos lotes a impulsar desde la estación cabecera (I^{new}) puede utilizarse para identificar a la sucesión de ejecuciones del plan de transporte que permiten el desplazamiento de los combustibles hacia la terminal del sistema:

$$I^{new} = \{i_{q+1}, i_{q+2}, \dots, i_n\}$$

Más aún, como los nuevos lotes de combustible se disponen en el mismo orden en que transitan por el ducto en el conjunto I^{new} , las corridas de bombeo asociadas a cada uno de ellos también estarán así ordenadas en el tiempo. En otras palabras, el nuevo “batch” i_{q+1} , que es inyectado en la línea durante la ejecución i_{q+1} , se transporta a lo largo de la tubería *inmediatamente* delante del “batch” i_{q+2} . Del mismo modo, este último es introducido en el ducto durante una corrida homónima *inmediatamente* posterior: i_{q+2} .

Esta idea simple pero muy efectiva constituye la base de los modelos de transporte de escala continua para poliductos con origen único. Sin embargo, como se analizará más adelante, al abordar líneas de transmisión con múltiples fuentes o refinerías, este ordenamiento común de corridas de bombeo y lotes de combustible en el ducto tiene que relajarse y dos conjuntos diferentes se deben usar para representar con exactitud el funcionamiento de estos sistemas de transporte comunes o “common carriers”.

Conjunto de Productos Transportados

La complejidad que plantea el problema de transporte a través de poliductos es inherente a la multiplicidad de combustibles impulsados dentro de una misma tubería. El término “poli-ducto” refiere a un “ducto” capaz de transportar diversas especies o combustibles, utilizando una única línea. En ductos destinados al transporte de productos refinados (poliductos propiamente dichos), el conjunto de productos puede incluir: naftas de distintos grados (nafta virgen, nafta común, nafta súper, nafta prémium, etc.),

diesel, kerosene de calefacción, combustible de impulsión jet para aviones (JP), gas licuado de petróleo (LPG), propano, butano y muchas especies más.

Por otra parte, las líneas de transporte de petróleo crudo, que normalmente se denominan “oleoductos”, no dejan de ser “poliductos” en el sentido estricto de conducir múltiples especies de productos líquidos, provenientes de distintos pozos de extracción, y con propiedades físico-químicas claramente disímiles. En algunos casos, la diversidad de crudos transportados supera la decena, y la planificación de estos sistemas logísticos plantea enormes desafíos para el aprovisionamiento de materias primas a las unidades de refino. En particular, los modelos de representación descritos a lo largo del trabajo se enfocarán en la problemática de poliductos que transportan productos refinados. No obstante, la extrapolación del modelo a la planeación de oleoductos de petróleo es directa.

En síntesis, la cantidad de especies puede ir de unos pocos productos de alta demanda, a varias decenas de combustibles específicos para cada uso. El conjunto asociado se define como:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$$

En los gráficos que representan la evolución de los lotes en el tiempo, cada una de las especies se identificará con un color o trama distinta, tal como se ilustra en la Figura III.5.

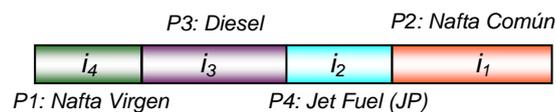


Figura III.5. Ejemplo de Identificación de Productos dentro del Poliducto

Conjunto de Períodos de Tiempo

Por último, el horizonte de planeación se divide en períodos diarios, cada uno de los cuales constituye un elemento del conjunto:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_h\}$$

Los días t_1, t_2, \dots, t_h se encuentran ordenados cronológicamente, de tal modo que el elemento t_1 es el primer período o día del horizonte, que comienza a la hora $t = 0$ y culmina a la hora $t = 24$. En ese mismo momento, se inicia el período t_2 que transcurre hasta la hora $t = 48$, y así sucesivamente hasta

alcanzar el final del horizonte. Normalmente, el horizonte de planeación puede abarcar desde una semana a un mes de duración, dependiendo del caso. Aún así, la extensión del horizonte abordado nunca debería ser inferior al tiempo que insume el transporte de los combustibles desde el origen hasta el destino del poliducto.

La definición del conjunto de períodos que componen el horizonte busca permitir el control diario de los niveles de inventario en la terminal del sistema, a partir de contabilizar los nuevos volúmenes que diariamente se descargan del poliducto troncal y descontar el material que se retira en camiones desde el centro de distribución hacia los mercados de consumo.

III.3.4 Restricciones Operativas

En la formulación matemática propuesta, las restricciones se han agrupado en seis categorías principales: (a) *Conformación de Lotes*, (b) *Períodos de Detención de la Línea*, (c) *Seguimiento de los Envíos*, (d) *Abastecimiento de Combustibles a la Estación Terminal*, (e) *Satisfacción de las Demandas del Mercado*, y (f) *Control de los Niveles de Inventario en Tanques de la Estación Terminal*.

III.3.4.a Conformación de Lotes

El primer bloque de ecuaciones permite definir el producto asignado a cada uno de los lotes, la secuencia de inyecciones o corridas de bombeo, la duración de esas corridas y el volumen interfacial entre “batches” consecutivos que transportan productos distintos.

Definición del Combustible Transportado. Todo nuevo “batch” $i \in I^{new}$, a ser inyectado en el poliducto durante el horizonte de planeación actual, puede transportar un único combustible $p \in P$. Si la variable binaria $y_{i,p}$ representa la asignación del producto p al nuevo lote $i \in I^{new}$, luego:

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (III.1)$$

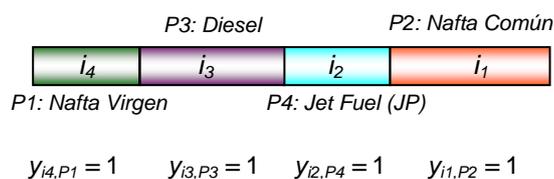


Figura III.6. Variables Binarias de Asignación de Productos

La Figura III.6 ilustra el valor que adoptan las variables binarias $y_{i,p}$ para cada uno de los lotes que conforman el tren de envíos que transitan por el poliducto.

Como el número de nuevos “batches” de combustible es propuesto de antemano, es probable que algunos elementos del conjunto I^{new} no sean requeridos para conformar el programa de transporte óptimo. Estos lotes nunca serán impulsados dentro de la línea, y se denominarán “batches ficticios”. Para todo lote ficticio, no hay producto $p \in P$ asignado al mismo, y todas las variables $y_{i,p}$ toman valor nulo ($\sum_p y_{i,p} = 0$).

Tal como se ha planteado en las secciones previas, la cardinalidad del conjunto I^{new} debería coincidir al menos con el número de nuevos lotes impulsados en el programa de transporte óptimo. Una primera estimación del valor de $|I^{new}|$ para inicializar el proceso de resolución está dada por:

$$|I^{new}| = \sum_{p \in P} \frac{1}{\langle b \rangle_p} (\sum_{t \in T} dem_{p,t}) \quad (III.2)$$

donde $\langle b \rangle_p$ simboliza el tamaño promedio de los envíos de producto p , y $dem_{p,t}$ es la demanda del mismo combustible en la terminal de recepción del poliducto, a despachar al mercado durante el período t .

En cualquier instancia del proceso de resolución, si *todos* los elementos del conjunto de nuevos lotes I^{new} se utilizan para conformar la mejor solución del programa de transporte, existe la posibilidad de que el valor de $|I^{new}|$ sea insuficiente, y la solución óptima del problema aún no haya sido encontrada. En ese caso, el valor de $|I^{new}|$ se incrementa en uno y la formulación resultante se resuelve nuevamente, en instancias sucesivas del proceso de resolución. Este procedimiento iterativo se detiene cuando algún elemento del conjunto I^{new} no se ejecuta en el programa óptimo hallado. Aún cuando el valor de $|I^{new}|$ sea demasiado bajo para atender todas las demandas de combustibles, es posible obtener una solución sub-óptima, dado que el modelo MILP propuesto permite operar la línea en presencia de faltantes de combustibles en tanques de la estación terminal, y atender requerimientos de productos en forma tardía. En otras palabras, un programa factible podría incluir tardanzas en los despachos de combustible, e incluso demandas insatisfechas hacia el final del horizonte, pagando por ello un costo comparativamente alto.

Secuenciación de Envíos. La inyección de un nuevo lote $i \in I^{new}$ en el origen del poliducto debería comenzar recién después de haber concluido con la inyección del lote precedente $(i - 1)$ y luego de efectuadas las operaciones de transición o “changeover” que se requieren.

$$C_i - L_i \geq C_{i-1} + \tau_{p,p'}(y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1) \quad \forall i \in I^{new}; p, p' \in P \quad (\text{III.3})$$

$$L_i \leq C_i \leq h_{\max} \quad \forall i \in I^{new} \quad (\text{III.4})$$

La variable continua C_i representa el tiempo de culminación de la corrida de bombeo $i \in I^{new}$, encargada de introducir el lote homónimo en la estación cabecera del sistema. Asimismo, la variable L_i constituye la duración de dicha corrida, mientras que el parámetro h_{\max} simboliza la extensión total del horizonte de planeación. La diferencia $(C_i - L_i)$ puede interpretarse como el tiempo de inicio de la ejecución i . Todos estos valores se expresan normalmente en horas, siendo la unidad de medida de tiempo que mejor se ajusta a los requerimientos del planificador para la configuración del programa de operaciones.

Por su parte, $\tau_{p,p'}$ es el tiempo de transición o “changeover” entre dos inyecciones consecutivas de productos p y p' , en ese orden. Dado un par de “batches” no-ficticios consecutivos $(i - 1, i)$ solo una de las Ecuaciones (III.3) se impondrá en el óptimo. La restricción activa involucrará al par de productos $p-p' \in P$ siempre que los nuevos “batches” $(i - 1)$ e i contengan productos p y p' , respectivamente. En otras palabras, aquel par de productos que vuelve el factor $(y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1)$ igual a uno impondrá un tiempo adicional $(\tau_{p,p'})$ al instante de culminación de la ejecución previa, para considerar el tiempo que toman las operaciones de transición en la estación cabecera al pasar de un producto a otro en la secuencia de inyección.

Duración de las Ejecuciones. Todo lote ficticio, no está asociado a ninguna corrida bombeo en el origen del poliducto ($\sum_p y_{i,p} = 0$), y su hipotética inyección debe presentar una duración nula ($L_i = 0$). Asimismo, los valores mínimo y máximo permitidos $(Q_{\min,p}, Q_{\max,p})$ para el volumen de los envíos de cada uno de los combustibles fijarán cotas a la duración de las corridas de bombeo no-ficticias, en función del caudal de inyección de cada producto (vb_p) .

$$\sum_{p \in P} l_{\min,p} y_{i,p} \leq L_i \leq \sum_{p \in P} l_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{donde: } l_{\min,p} = \frac{Q_{\min,p}}{vb_p} \quad ; \quad l_{\max,p} = \frac{Q_{\max,p}}{vb_p} \quad \forall p \in P \quad (\text{III.6})$$

Es importante observar que si una corrida de bombeo cualquiera tiene asignada la inyección de algún combustible p' ($\sum_p y_{i,p} = 1$), la duración de esta corrida asume necesariamente un valor finito (no nulo) dependiente de la cota mínima adoptada para los “batches” de combustible p' y al propio caudal de inyección. En todo sistema de distribución de combustibles por tuberías se supone un valor finito del parámetro $V_{\min,p}$, lo suficientemente grande como para justificar la transición de un combustible a otro en la secuencia de envíos. En otras palabras, no existe la posibilidad de que una ejecución no-ficticia ($\sum_p y_{i,p} = 1$) tenga duración nula, ni que un “batch” con tiempo de inyección nulo sea no-ficticio.

Ejecuciones Ficticias. Con el objetivo de acelerar el proceso de resolución del modelo matemático, las corridas ficticias $i \in I^{new}$ que presentan $\sum_p y_{i,p} = 0$ y obviamente $L_i = 0$ en el óptimo, deberían postergarse hacia el final de la secuencia de inyecciones. De esta forma, puede recortarse un número muy importante de soluciones alternativas que posicionan a las ejecuciones ficticias en distintos lugares de la secuencia, conduciendo en todos los casos a la misma solución óptima del problema. Si NR es el número de corridas de bombeo efectivamente ejecutadas, los últimos $[|I^{new}| - NR]$ elementos del conjunto I^{new} se reservan para los “batches” ficticios que nunca se impulsan dentro de la tubería. A ese fin, se incorporan al modelo las siguientes restricciones:

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (\text{III.7})$$

Puede notarse que, si una corrida $(i - 1)$ es ficticia ($\sum_p y_{i-1,p} = 0$), la corrida posterior i también lo será ($\sum_p y_{i,p} \leq \sum_p y_{i-1,p} = 0$). Por carácter transitivo, todas las corridas sucesivas, hasta el último elemento del conjunto I^{new} corresponderán a “batches” que no requieren ser impulsados dentro de la línea y no formarán parte de la solución óptima del problema.

Volumen Contenido en los Lotes. Sea Q_i la variable continua que involucra el volumen total transportado por el “batch” i . A su vez, $QP_{i,p}$

representa la cantidad de producto p en el lote i que coincide con el tamaño Q_i si el mismo contiene combustible p , y toma un valor nulo en caso que el producto p no haya sido asignado al “batch” i . La relación entre los valores de Q_i y $QP_{i,p}$ queda establecida mediante el siguiente grupo de ecuaciones:

$$QP_{i,p} \leq Q_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (\text{III.8})$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i,p} = Q_i \quad \forall i \in I \quad (\text{III.9})$$

El parámetro $V_{\max,p}$ fija un tamaño máximo posible para las inyecciones de combustible p en la línea. En consonancia con las Ecuaciones (III.5) y (III.6), todo “batch” ficticio, no inyectado en el poliducto durante el horizonte actual, carece de producto asignado ($\sum_p y_{i,p} = 0$), y en consecuencia posee dimensión nula.

Por otra parte, la Hipótesis (6) sugiere un caudal de inyección distinto para cada una de las especies transportadas (vb_p), ajustado a las propiedades físicas del combustible (densidad, viscosidad, etc.), y a los medios disponibles para su impulsión (conexiones, válvulas, bombas, etc.). El control del caudal de bombeo de cada lote i se efectúa a través del bloque de Restricciones (III.10).

$$\begin{aligned} LP_{i,p} &= \left(\frac{1}{vb_p} \right) QP_{i,p} & \forall i \in I^{new}, p \in P \\ L_i &= \sum_{p \in P} LP_{i,p} & \forall i \in I^{new} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

Nótese que la variable $LP_{i,p}$ se anula siempre que $QP_{i,p} = 0$.

Volumen de las Interfases entre “Batches” Consecutivos. En general, tal como se supuso en las hipótesis de trabajo, no existe dispositivo físico de separación entre dos lotes consecutivos de combustibles distintos, lo que origina la formación de un volumen de producto-mezcla de características indefinidas denominado interfase. Si bien se sabe que el volumen del combustible-mezcla depende del caudal de transporte y de las detenciones de la línea (durante las cuales suele extenderse la interfase por la difusión de las especies), el nivel de contaminación depende mayoritariamente del par de productos puestos en contacto. Así, el programador de la línea suele enfocarse a la búsqueda de la secuencia de combustibles de mayor grado de compatibilidad, dejando en manos del sector de operaciones el seguimiento

detallado del volumen de las interfases en función del caudal al que se transportan, y de las detenciones del poliducto.

Por definición, el “batch” $(i - 1) \in I$ ha sido impulsado dentro de la tubería en una instancia de bombeo previa a la del “batch” $i \in I$. En consecuencia, el volumen de la interfase entre ambos “batches” consecutivos no debería ser inferior al parámetro $IF_{p,p'}$, siempre que ambos lotes $(i - 1)$ e i contengan productos p y p' , respectivamente (ver Figura III.7). Este parámetro denota el volumen de combustible-mezcla que transita entre dos lotes consecutivos de productos p y p' , en ese orden.

$$WIF_{i,p,p'} \geq IF_{p,p'}(y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1) \quad \forall i \in I, i > 1, p \neq p' \in P \quad (III.11)$$

Para todo “batch” i impulsado dentro de la línea, un único par de productos $p \neq p'$ (si $y_{i-1,p} = y_{i,p'} = 1$) forzará una cota inferior finita para la variable no negativa $WIF_{i,p,p'}$, la cual expresa el volumen de la interfase generada entre el “batch” i y su predecesor $(i - 1)$, transportando productos p y p' . Sólo para ese par de productos el factor $(y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1)$ adoptará valor unitario, y en cualquier otro caso tomará valor nulo o negativo, relajando la restricción. Obviamente que la dimensión de la interfase será lo más pequeña posible, en cualquier solución del problema, de modo de evitar una reducción importante en el contenido efectivo de cada “batch”. La Figura III.7 ilustra el significado de la Ecuación (III.11).

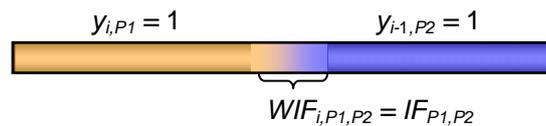


Figura III.7. Definición del Volumen Interfacial

La mayor parte de los modelos de planeación del transporte por poliductos publicados en la literatura han desestimado el volumen interfacial frente al contenido propio de los lotes transportados. Sin embargo, resulta conveniente tener en cuenta este aspecto a la hora de calcular las cantidades de combustible “puro”, efectivamente descargadas en tanques de la estación terminal. Más aún, las compañías operadoras de poliductos llevan un control diario de los volúmenes de producto-mezcla descargados en la terminal de destino. A diferencia de las representaciones discretas, el modelo continuo es

capaz de dimensionar y hacer el seguimiento de la ubicación de las interfases desde el origen hasta la estación terminal del sistema.

Secuencias de Productos No Permitidas. Buscando evitar un nivel de contaminación inadmisibles, ciertas secuencias de productos se prohíben por su alto nivel de incompatibilidad. Tal es el caso del gas licuado de petróleo (LPG) y el combustible diesel, cuyos pesos específicos difieren considerablemente. Si (p, p^*) representa una secuencia de productos prohibida, no es posible impulsar en la tubería dos lotes consecutivos de combustibles p y p^* . En consecuencia, la siguiente restricción se incorpora a la formulación matemática del problema:

$$y_{i-1,p} + y_{i,p^*} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new}, (p, p^*) \text{ incompatible} \quad (\text{III.12})$$

III.3.4.b Períodos de Detención de la Línea

Existen diversos motivos que llevan al programador del poliducto a detener el funcionamiento de la línea en ciertos períodos del horizonte temporal. Algunos de ellos corresponden a circunstancias particulares que no habían sido previstas al momento de abordar la planeación, mientras otros están ligados a detenciones programadas, que en general involucran actividades de mantenimiento preventivo sobre el sistema de transporte.

Detenciones Imprevistas. Una de las causas más frecuentes que provocan la detención imprevista de la línea es la falta de capacidad de almacenamiento para algún producto en la terminal de recepción. Cuando un lote de combustible arriba a su destino, los tanques asignados deben poseer capacidad libre suficiente para poder alojarlo. De no ser así, la línea debe detenerse, dando lugar a lo que se conoce como “disrupted operation”. La actividad del poliducto se reestablece cuando logra descargarse el volumen necesario en la estación terminal para liberar capacidad de almacenamiento, a través del despacho de productos al mercado. Otro motivo es el uso parcial de la capacidad de transporte del poliducto durante el horizonte actual. En este caso, el modelo de planeación escoge el momento más apropiado para detener la línea, de tal forma de no incumplir con el compromiso de entrega de los lotes de combustible. El intervalo de detención queda definido entre dos inyecciones de lotes consecutivos $(i-1)$ e i , siempre que el inicio de la inyección

sucesora ($C_i - L_i$) se retrase respecto de la culminación de la corrida previa (C_i), de modo que $C_i - L_i > C_{i-1} + \tau$, donde τ representa el tiempo de transición normal entre ambos envíos.

Detenciones Programadas. Consideremos ahora un conjunto de detenciones programadas por el operador del poliducto ($\ell \in L$) que han sido dispuestas a lo largo del horizonte actual de planificación para cumplimentar tareas rutinarias de mantenimiento preventivo sobre la línea. El desarrollo de las tareas de mantenimiento en cada instancia insume un tiempo definido por el intervalo $[s_\ell, e_\ell]$. El conjunto de detenciones programadas $\ell \in L$ se encuentra ordenado cronológicamente, de modo que $e_\ell < s_{\ell+1}$. Para contemplar los períodos en los cuales el bombeo de combustibles debe ser interrumpido, se incorporan al modelo las variables binarias $w_{i,\ell}$. Toda corrida de bombeo i que culmine antes del inicio de la detención ℓ ($C_i < s_\ell$) tendrá asociada una variable binaria $w_{i,\ell}$ con valor nulo ($w_{i,\ell} = 0$). Caso contrario, el inicio de la corrida i deberá postergarse hasta tanto se haya culminado con las tareas de mantenimiento ($C_i - L_i > e_\ell$) y en consecuencia $w_{i,\ell} = 1$. Por lo tanto,

$$C_i \leq s_\lambda + (h_{\max} - s_\lambda) w_{i,\lambda} \quad \forall i \in I^{new}, \lambda \in L \quad (\text{III.13})$$

$$C_i - L_i \geq e_\lambda w_{i,\lambda} \quad \forall i \in I^{new}, \lambda \in L \quad (\text{III.14})$$

$$w_{i,\lambda+1} \leq w_{i,\lambda} \quad ; \quad w_{i-1,\lambda} \leq w_{i,\lambda} \quad \forall i \in I^{new}, \lambda \in L \quad (\text{III.15})$$

De acuerdo con las Ecuaciones (III.13) y (III.14), si la variable binaria $w_{i,\ell}$ es igual a cero, se debe cumplir que $C_i \leq s_\ell$, mientras que la condición $C_i - L_i \geq 0$ se torna redundante. Pero si $w_{i,\ell} = 1$, $C_i \leq h_{\max}$ es condición redundante, y la expresión $C_i - L_i \geq e_\ell$ impone una cota inferior al tiempo de inicio de la corrida de bombeo i , posterior a la detención ℓ .

Por otra parte, las Restricciones (III.15) establecen que toda corrida de bombeo i que culmina antes de la detención ℓ ($w_{i,\ell} = 0$) por el ordenamiento cronológico del conjunto de detenciones L , también ha de culminar antes de la detención $\ell + 1$ ($w_{i,\ell+1} = 0$). Más aún, si la corrida i se ejecuta después del período de detención $\ell + 1$ ($w_{i,\ell+1} = 1$), es obvio que su desarrollo también será posterior al intervalo de detención ℓ ($w_{i,\ell} = 1$). En forma análoga, a partir del ordenamiento cronológico del conjunto I^{new} , la corrida $i - 1$ se completará

antes del período ℓ ($w_{i-1,\ell} = 0$) si la corrida sucesora i también se completa a un tiempo $C_i \leq s_\ell$ ($w_{i,\ell} = 0$).

Es importante notar que la ocurrencia de períodos programados de detención del poliducto aumenta las posibilidades de desabastecimiento de la terminal de recepción.

III.3.4.c Seguimiento de los Envíos

Cuando se considera el transporte de múltiples combustibles a través de un poliducto unidireccional con origen y destino únicos, pueden diseñarse ecuaciones relativamente sencillas, que permiten realizar un seguimiento preciso de los “batches” o lotes de producto en el tiempo. Dado que no se producen entregas parciales de material en puntos intermedios del trayecto, el contenido de los lotes no se modifica hasta tanto se alcanza la coordenada final del sistema de transporte, donde se halla el centro de recepción y almacenamiento de los combustibles. El volumen contenido en cada lote i que transita por la tubería permanecerá igual al valor inicialmente inyectado (Q_i), y se mantendrá constante a lo largo de todo el recorrido. El lote estará constituido mayoritariamente de combustible puro, y un volumen pequeño corresponderá al producto-mezcla generado en las interfases.

No obstante, para localizar correctamente al lote de combustible dentro del poliducto, es necesario introducir la variable continua $F_i^{(i)}$ que representa la coordenada volumétrica superior del lote i al tiempo de finalización de la corrida de bombeo i . En otras palabras, $F_i^{(i)}$ es el volumen total comprendido entre el origen del sistema y el extremo más alejado del lote i , al tiempo C_i (ver Figura III.8).

$$F_i^{(i')} = \sum_{\lambda=i}^{i'} Q_\lambda \quad \forall i, i' \in I^{new} \quad (i \leq i') \quad (III.16)$$

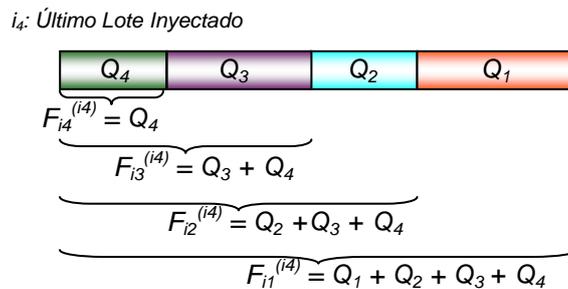


Figura III.8. Coordenada Superior de los Lotes Inyectados

A partir de la condición de continuidad del flujo dentro de la tubería, y considerando la hipótesis de incompresibilidad de los combustibles transportados, la coordenada de localización del lote i luego de cumplimentar la corrida de inyección del “batch” $i' \geq i$ (posterior a i) se podrá calcular sumando los volúmenes de los lotes $i, i + 1, i + 2, \dots, i'$, inyectados desde el instante $C_i - L_i$ (inicio del bombeo del lote i), hasta el tiempo $C_{i'}$ (fin de la corrida i').

Sea σ la coordenada volumétrica de la única terminal de recepción del sistema, es decir, el volumen total del ducto en toda su extensión. Si $F_i^{(i')} > \sigma$, entonces una fracción del lote i (o quizás el lote i completo) se habrá descargado en los tanques de la estación terminal, luego de completar la inyección del lote i' (esto es, a tiempo $C_{i'}$). Para todo “batch” introducido en el horizonte previo ($i \in I^{old}$) que reside en el interior de la tubería al iniciar el nuevo programa de operaciones, la coordenada actual de localización es un dato del problema (F_i^o). Asimismo, el movimiento de estos lotes, a medida que transcurren las nuevas ejecuciones del plan, estará dado por la Ecuación (III.17).

$$F_i^{(i')} = F_i^o + \sum_{\substack{\lambda \in I^{new} \\ \lambda \leq i'}} Q_\lambda \quad \forall i \in I^{old}, i' \in I^{new} \quad (III.17)$$

En los capítulos siguientes, al estudiar sistemas de transporte con mayor número de centros de recepción a lo largo del recorrido, será necesario introducir una nueva variable continua que detalle el contenido de cada lote al final de cada corrida de bombeo.

III.3.4.d Abastecimiento de Combustibles a la Estación Terminal

Cada vez que un lote de combustible alcanza la coordenada final del poliducto, donde está establecida la terminal de recepción del sistema, comienzan las operaciones de descarga. Como ya se ha dicho, para realizar la descarga de combustibles en la estación terminal, es imprescindible inyectar, al mismo tiempo, un nuevo lote de combustible en el origen de la línea. No obstante, la descarga de un lote puede realizarse en diversas entregas parciales, cada una de las cuales ocurre durante la ejecución de una corrida de bombeo distinta.

Definamos la variable binaria $x_i^{(i')}$ para indicar que una cierta cantidad de producto contenido en el lote $i \in I$ (en tránsito por el poliducto) se descarga

en la terminal de recepción durante la inyección de un “batch” posterior $i' \geq i$. La condición $x_i^{(i')} = 1$ denota que una porción del “batch” i arriba a su destino mientras se ejecuta la corrida de inyección del lote i' en la estación cabecera. Caso contrario, $x_i^{(i')} = 0$, y el material contenido en el lote i no puede descargarse en los tanques asignados, al menos durante la ejecución i' . Los requisitos que debe cumplir un lote i para permitir su transferencia parcial o total desde el poliducto hacia la terminal de recepción, están dados por los siguientes bloques de restricciones:

$$D_{\min} x_i^{(i')} \leq D_i^{(i')} \leq D_{\max} x_i^{(i')} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i \leq i') \quad (III.18)$$

$$D_i^{(i')} \leq F_i^{(i')} - \sigma x_i^{(i')} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i \leq i') \quad (III.19)$$

Si $x_i^{(i')} = 0$, la Ecuación (III.18) torna nula la variable continua $D_i^{(i')}$ (volumen total derivado desde el lote i al destino, durante la ejecución i'), y la Ecuación (III.19) se reduce a $F_i^{(i')} \geq 0$ (condición redundante). Caso contrario, $D_{\min} \leq D_i^{(i')} \leq D_{\max}$, y por la Ecuación (III.19), la cantidad entregada debe ajustarse a un tope de: $D_i^{(i')} \leq F_i^{(i')} - \sigma$, unidades volumétricas. Es importante notar que la diferencia $[F_i^{(i')} - \sigma]$ (cuando adopta un valor positivo) es el volumen de aquella fracción del lote i que ha “superado” los límites del poliducto para ser descargada en los tanques de almacenamiento de la terminal. Por otra parte, si la diferencia $[F_i^{(i')} - \sigma]$ es negativa o nula, implica que el lote i aún no ha arribado a destino al tiempo $C_{i'}$, y la única forma de cumplir con la Restricción (III.19) y con la condición de no negatividad que pesa sobre la variable $D_i^{(i')}$, es haciendo nula la variable binaria $x_i^{(i')}$.

Además, existen dos condiciones adicionales por satisfacer. Primero, la cantidad total de combustible transferida desde un lote i a los tanques de la estación terminal nunca puede superar el tamaño original de dicho lote. Este valor viene dado por la variable Q_i para los nuevos “batches” inyectados, y por el parámetro Q_i^o (dato del problema) para aquellos lotes disponibles dentro del poliducto al momento de planificar las operaciones.

$$\sum_{\substack{i' \in I^{new} \\ i \leq i'}} D_i^{(i')} \leq Q_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (III.20)$$

$$\sum_{i' \in I^{new}} D_i^{(i')} \leq Q_i^o \quad \forall i \in I^{old} \quad (III.21)$$

En segundo término, dada la condición de incompresibilidad de los líquidos transportados y el hecho que el poliducto permanece lleno en todo momento, debe imponerse el balance volumétrico en torno al contenido de la línea. Por lo tanto, el volumen total de productos entregados en la terminal, provenientes de uno o varios lotes $i \in I$ durante la ejecución i' , debe coincidir exactamente con el tamaño del nuevo “batch” i' inyectado en el origen, cuya impulsión induce la derivación de los lotes $i \in I$ previamente introducidos.

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} D_i^{(i')} = Q_{i'}, \quad \forall i' \in I^{new} \quad (III.22)$$

Es importante analizar lo que ocurre con los lotes de combustible una vez que finaliza su descarga desde el poliducto. Siempre que la coordenada inferior de un lote i , al momento de iniciar una nueva ejecución i' ($F_{i+1}^{(i'-1)} - Q_i = F_{i+1}^{(i'-1)}$) haya superado la coordenada de localización del destino (σ) es decir $F_{i+1}^{(i'-1)} > \sigma$, el lote i se habrá descargado por completo en los tanques de la terminal al tiempo $C_{i'-1}$. Dicho de otro modo, la suma de los volúmenes descargados habrá alcanzado el tope impuesto por las Restricciones (III.20) y (III.21). En consecuencia, la Restricción (III.18) fuerza a las variables $D_i^{(i')}$ y $x_i^{(i')}$ a adoptar un valor nulo, de forma tal de satisfacer la condición $D_i^{(i')} \geq D_{\min} x_i^{(i')}$. El parámetro D_{\min} impone un tamaño mínimo conveniente para los despachos, y su valor es establecido por el operador de la línea a los efectos de no introducir o descargar lotes numerosos y demasiado pequeños. Como resultado, la condición $x_i^{(i')} = 0$ se verifica en dos posibles casos: (i) si el lote i aún permanece en tránsito dentro de la tubería, y no ha alcanzado el extremo de la línea al tiempo $C_{i'}$, o (ii) cuando el lote i ha sido descargado por completo del poliducto durante una ejecución previa $k < i'$. Estas ecuaciones son muy simples, pero permiten controlar con suma precisión y efectividad la evolución de los lotes en el tiempo.

Para analizar el desempeño de las Ecuaciones (III.16) a (III.22) consideremos un ejemplo sencillo, el cual se representa gráficamente en la Figura III.9. Al tiempo de culminación de la última corrida de bombeo ($C_{i'-1}$), correspondiente a la inyección del nuevo “batch” $(i'-1) = B4$, existen cuatro lotes de combustible B4-B3-B2-B1 dentro de la línea, que contienen productos P3-P1-P2-P1, respectivamente. Supongamos que el “batch” más alejado (B1) ha sido parcialmente descargado en tanques de la terminal de destino durante la ejecución $i' - 1$. De este modo, $D_{B1}^{(i'-1)} = F_{B1}^{(i'-1)} - \sigma = 21000 - 18000 = 3000$

m³. La ejecución subsiguiente i' introduce el nuevo “batch” B5, que contiene producto P4, en una cantidad $Q_{B5} = 10000$ m³. Por la Ecuación (III.16), $F_{B1}^{(i')} = Q_{B1} + Q_{B2} + \dots + Q_{i'} = 7000 + 5000 + 6000 + 3000 + 10000 = 31000$ m³. Similarmente, $F_{B2}^{(i')} = 24000$ m³, $F_{B3}^{(i')} = 19000$ m³, $F_{B4}^{(i')} = 13000$ m³ y $F_{B5}^{(i')} = 10000$ m³.

Tal como lo impone la Restricción (III.19), sólo los lotes B1, B2 y B3, que presentan $F_i^{(i')} > \sigma$ pueden descargar productos en la terminal de recepción durante la ejecución i' . La entrega de combustible desde el lote B2 ($D_{B2}^{(i')}$) está acotada al tamaño original del propio “batch” B2 (Q_{B2}). Dicho de otro modo, $D_{B2}^{(i')} \leq Q_{B2} = 5000$ m³ (Ecuación (III.20)). Por otra parte, el volumen abastecido desde el lote B3 está limitado por la Ecuación (III.19) a aquella fracción del envío que ha superado la coordenada del destino, esto es $D_{B3}^{(i')} \leq F_{B3}^{(i')} - \sigma = 19000 - 18000 = 1000$ m³. Por último, la ecuación de balance volumétrico (III.22) establece el despacho mínimo requerido desde el lote B1 para poder equilibrar el volumen inyectado durante la ejecución $i' = B5$ ($Q_{B5} = 10000$ m³):

$$D_{B1}^{(i')} = Q_{i'} - D_{B2}^{(i')} - D_{B3}^{(i')} \geq 10000 - 5000 - 1000 = 4000 \text{ m}^3$$

Ahora bien, la Ecuación (III.20) limita el valor de la variable $D_{B1}^{(i')}$ al contenido actual del lote B1, descontando las entregas previas, es decir: $D_{B1}^{(i')} \leq Q_{B1} - D_{B1}^{(i'-1)} = 7000 - 3000 = 4000$ m³. En consecuencia, la única forma de satisfacer todas las restricciones es haciendo: $D_{B1}^{(i')} = 4000$ m³, $D_{B2}^{(i')} = 5000$ m³ y $D_{B3}^{(i')} = 1000$ m³, tal como se ilustra en la Figura III.9.

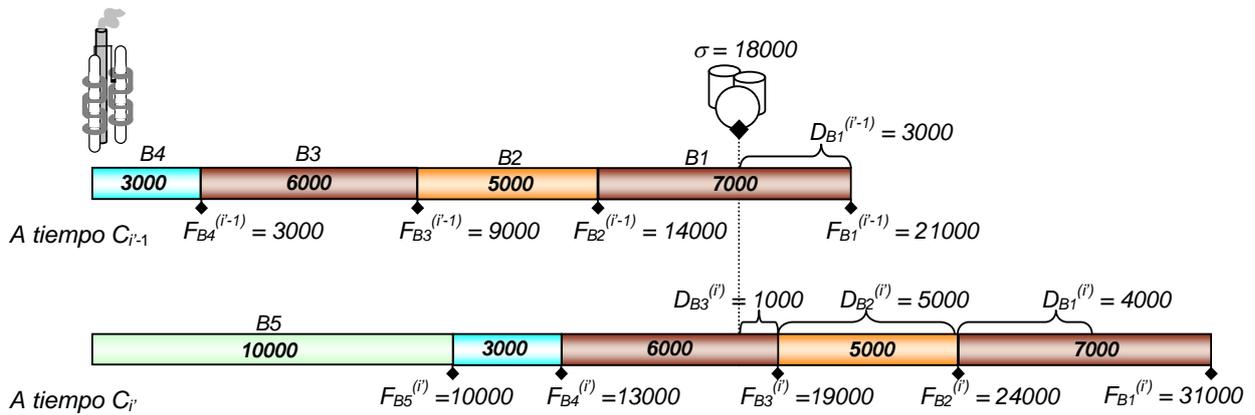


Figura III.9. Ejemplo Sencillo que Ilustra las Restricciones (III.16) a (III.22)

III.3.4.e Satisfacción de las Demandas del Mercado

Entre las hipótesis de trabajo se ha planteado la necesidad de atender diariamente las demandas del mercado desde el centro de distribución, despachando combustible de aquellos lotes que se hayan descargado completamente del poliducto. Este modo de operación busca imponer un mayor control y un seguimiento riguroso de la calidad de los combustibles transportados, preservando la trazabilidad del producto. Para ello, es necesario coordinar diariamente los flujos de ingreso y egreso de “batches” en la terminal de recepción.

Arribo de Lotes a la Estación Terminal. A los efectos de determinar el tiempo exacto al cual se produce el arribo de los lotes a la estación de destino, se propone reutilizar la variable binaria $x_i^{(l)}$. El objetivo es establecer si el lote i permanece en tránsito dentro del poliducto, o ya ha arribado a la terminal durante la ejecución de la corrida de bombeo i' . Siempre que $x_i^{(l)} = 0$ y $F_i^{(l)} < \sigma$ para todas las corridas $l = i, i + 1, \dots, i'$, puede asegurarse que el lote i permanece enteramente dentro del poliducto durante todas las corridas de inyección $i \leq l \leq i'$. Si por el contrario $x_i^{(i')} = 1$, el lote i ha arribado a la estación terminal, y la operación de descarga desde la línea ha comenzado. En el caso que la descarga del lote se haya completado durante la corrida i' , el valor de la variable binaria $x_i^{(i'+1)}$ se torna nuevamente nulo.

Si la variable continua AT_i representa el tiempo al que finaliza el arribo del lote $i \in I$ a su destino, se puede establecer una cota inferior para esta variable, a partir de la siguiente condición:

$$AT_i \geq (C_{i'} - L_{i'}) + G_i^{(i')} - H(1 - x_i^{(i')}) \quad \forall i \in I, i < |I|, i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (\text{III.23})$$

donde $G_i^{(i')}$ es el tiempo total requerido para expulsar al lote i fuera de la línea, contado a partir del instante de inicio de la nueva corrida $i' \geq i$, que comienza al tiempo $(C_{i'} - L_{i'})$. Por lo tanto, todo lote de combustible i descargado en los tanques de la estación terminal durante una corrida de bombeo posee un tiempo característico AT_i , que simboliza el tiempo más temprano al cual el lote completo está disponible en el centro de recepción. Para una pronta disponibilidad del “batch” descargado, el modelo tiende a reducir el valor de la variable $G_i^{(i')}$ tanto como sea posible. Una cota inferior para el tiempo de expulsión de la porción de lote i que aún permanece en el poliducto al inicio de la corrida i' viene dada partir del bloque de Restricciones (III.24).

$$G_i^{(i')} \geq \frac{1}{vb_p} \left[\sigma y_{i',p} - F_{i+1}^{(i'-1)} - (Q_i - \sum_{\substack{\lambda=i \\ \lambda \in I^{new}}}^{i'} D_i^{(\lambda)}) \right] \quad (III.24)$$

$$\forall i \in I, i' \in I^{new} (i < i'), p \in P$$

El valor de $G_i^{(i')}$ dado por la Ecuación (III.24) sólo cobra importancia cuando $x_i^{(i')} = 1$, y la Ecuación (III.23) para el par de lotes $i < i'$ es activa. Si el lote i se descarga en la terminal durante dos o más ejecuciones $i' > i$, entonces dos o más instancias del Bloque (III.23) serán activas. De ellas, siempre la instancia correspondiente a la ejecución más tardía i^* (con mayor $C_{i'} - L_{i'}$) determinará el valor de AT_i .

Para el par de lotes $i < i^*$, sólo una de las Ecuaciones (III.24) se impone: aquella que presenta $y_{i^*,p} = 1$. Dicho de otro modo, el tiempo remanente de descarga del lote i ($G_i^{(i')}$) depende del producto p que está siendo inyectado en el origen (lote i) ya que éste define el caudal de transporte vb_p del resto de los lotes que transitan por la línea.

Analicemos detenidamente el desempeño de la Ecuación (III.23). Como ya se ha dicho, si $x_i^{(i')} = 0$ y $F_i^{(i')} \leq \sigma$, el lote i aun no ha alcanzado su destino al tiempo $C_{i'}$. Por lo tanto, no han existido descargas de i a la estación receptora, y la restricción de cota para el tiempo de arribo se torna redundante.

$$AT_i \geq (C_{i'} - L_{i'}) + G_i^{(i')} - H \quad \forall i \in I, i < |I|, i' \in I^{new}, i' \geq i$$

El parámetro H representa el tiempo más tardío al cual podría estar entregándose el último “batch” inyectado en el horizonte actual, si el poliducto operase en forma ininterrumpida, esto es: $H = h_{max} + [\sigma / \min_p(vb_p)]$.

Supongamos ahora que $x_i^{(i')} = 1$, y cierta porción del lote $i \in I$ permanece dentro de la línea luego de completar la inyección del lote i' . En este caso, se verifica la condición $\sum_{\lambda=i}^{i'} D_i^{(\lambda)} < Q_i$, y la cota inferior para el tiempo de expulsión del lote i viene dada por:

$$G_i^{(i')} \geq \left(\frac{1}{vb_p} \right) \left[\sigma - F_{i+1}^{(i'-1)} - (Q_i - \sum_{\lambda=i}^{i'} D_i^{(\lambda)}) \right]$$

Por un lado, la diferencia $\sigma - F_{i+1}^{(i'-1)}$ cuenta el volumen contenido entre la coordenada inferior del lote i y el extremo de la línea, al tiempo $C_{i'-1}$. En otras palabras, es el volumen total que resta ser bombeado para retirar por completo al lote i del poliducto (ver Figura III.10). Por otra parte, la diferencia

$Q_i - \sum_{\lambda=i}^{i'} D_i^{(\lambda)}$ representa el contenido del lote i al finalizar la corrida i' . Como resultado, la resta entre ambos bloques es el propio volumen de la inyección i' ($Q_{i'}$), que no alcanza a entregar el “batch” i por completo a la terminal. De esta manera, se resta al tiempo de descarga de todo el lote i residente en el ducto al inicio de la corrida i' , aquél requerido para expulsar la porción de lote i que aún permanece en la tubería al final de la ejecución i' . En consecuencia: $G_i^{(i')} \geq L_{i'}$, y $AT_i \geq C_{i'}$. Obviamente, este valor no constituye una cota fuerte para el tiempo de descarga del lote completo i .

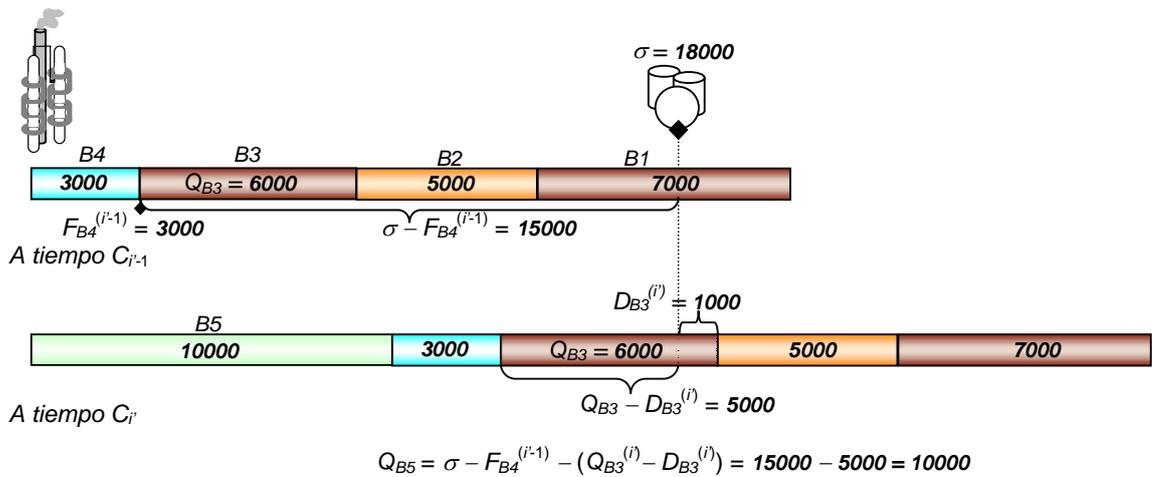


Figura III.10. Análisis del Significado de las Restricciones (III.23) y (III.24)

Continuando con el análisis, el instante final de descarga del lote i a los tanques de la terminal (AT_i) quedará determinado por aquella corrida de bombeo i^* durante la cual se complete la transferencia de combustible desde el lote i , verificando $Q_i - \sum_{\lambda=i}^{i^*} D_i^{(\lambda)} = 0$. Si suponemos que el último lote inyectado i^* contiene producto p , la cota inferior para el tiempo de arribo del lote quedará definida por:

$$G_i^{(j)} \geq \left(\frac{1}{vb_p} \right) (\sigma - F_{i+1}^{(i^*-1)}) ; \quad AT_i \geq C_{i^*} - L_{i^*} + \left(\frac{1}{vb_p} \right) (\sigma - F_{i+1}^{(i^*-1)})$$

Tal como se ha indicado, $F_{i+1}^{(i^*-1)}$ es la coordenada inferior del lote i al tiempo de inicio de la corrida i^* , y la diferencia $\sigma - F_{i+1}^{(i^*-1)}$ representa el volumen de combustible que resta ser retirado del poliducto para completar la descarga del mismo lote i . Para disponer con prontitud del “batch” descargado, ambas restricciones se cumplirán estrictamente en el óptimo. Dicho de otro modo, el

lote estará disponible en los tanques de la terminal en el mismo momento en que finalice su descarga.

Secuenciación de los Tiempos de Arribo. Dado el ordenamiento secuencial del conjunto de lotes transportados, todo “batch” i se recibe en la estación terminal recién después de haberse completado la descarga del “batch” predecesor ($i - 1$). Si el lote i abandona el poliducto antes de la finalización del horizonte temporal (h_{\max}), su tiempo de arribo estará determinado por las Ecuaciones (III.23) y (III.24), donde se entiende por tiempo de arribo al tiempo más temprano de recepción del lote **completo** en los tanques asignados. No obstante, cuando una parte del lote i (o el lote i completo) permanece dentro de la línea al tiempo de cierre del horizonte de planeación, el instante más temprano al cual podrá disponerse del combustible involucrado se calculará a partir de la Restricción (III.25). Como es de esperar, la descarga recién se completará en una instancia futura del horizonte ($AT_i > h_{\max}$).

$$AT_i \geq AT_{i-1} + \left(\frac{Q_i}{\max_{p \in P} (vb_p)} \right) \quad \forall i \in I (i > 1) \quad (\text{III.25})$$

El último término del lado derecho de la ecuación representa una estimación optimista del tiempo total requerido para expulsar al lote i fuera del poliducto. Su valor supone que el “batch” i será entregado al máximo caudal posible, y que el poliducto podrá operar sin interrupciones. Para cualquier otro lote que alcance el extremo de la tubería antes del fin del horizonte, la Ecuación (III.25) impone una cota aproximada (no estricta) para los tiempos de arribo de los batches, siempre inferior a la provista por las Ecuaciones (III.23) y (III.24).

En secciones posteriores se analizará cómo se simplifica el modelo matemático cuando se adopta el mismo caudal de bombeo (vb) para todos los combustibles.

Identificación del Período de Arribo. Hasta aquí, los eventos de tiempo más importantes del modelo están asociados a la finalización de las corridas de bombeo $i \in I^{new}$, cuyo valor queda definido por las variables C_i . A partir de estos eventos, es posible establecer los instantes AT_i a los cuales se completa la descarga de los lotes, y el combustible contenido puede contarse así como material disponible en la estación terminal para atender las

demandas. Sin embargo, los requerimientos del mercado están agrupados en períodos diarios. Si se pretende monitorear con precisión los inventarios de combustible disponibles diariamente para atender la demanda, los tiempos de inicio y finalización de cada día $\{0, 24, 48, 72, 96, 120, \dots\}$ constituyen también puntos de referencia importantes a tener en cuenta. Introduzcamos la variable binaria $r_{i,t}$ para indicar que el lote i termina su descarga en el centro de recepción durante el período t . En otras palabras, si $r_{i,t} = 1$, el arribo del lote se completa en el intervalo $[dd_{t-1}, dd_t]$, siendo dd_t el tiempo de finalización del día t . En consecuencia,

$$\sum_{t \in T} dd_{t-1} r_{i,t} \leq AT_i \leq \sum_{t \in T} dd_t r_{i,t} \quad \forall i \in I \quad (\text{III.26})$$

Como el tiempo de arribo de todo lote no-ficticio i debe pertenecer a algún período diario t , la siguiente condición debe ser satisfecha,

$$\sum_{t \in T} r_{i,t} = \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I \quad (\text{III.27})$$

No obstante, ciertos “batches” de combustible permanecerán dentro de la tubería al momento de culminar el horizonte de planeación ($t = h_{\max}$). En esos casos, el tiempo de arribo posible AT_i excederá los límites del horizonte actual, motivo por el cual se han de incorporar algunos períodos diarios adicionales $\{tf1, tf2, \dots\}$ que presentarán límites de tiempo $\{dd_{tf1}, dd_{tf2}, \dots\}$ tales que: $h_{\max} < dd_{tf1} < dd_{tf2} < \dots$. De esta forma, el modelo propuesto será capaz de atribuir un período diario de arribo posible a cada uno de los lotes transportados, al considerar un horizonte extendido cuya duración H supere la longitud del horizonte de planeación actual.

III.3.4.f Control Diario de los Niveles de Inventario en la Terminal

Finalmente, habiendo determinado el período diario al cual se completa la descarga de cada uno de los lotes que arriban a la terminal, es necesario llevar adelante un control preciso de los niveles de inventario en los tanques del centro de recepción. El objetivo es corroborar la disponibilidad de productos al momento de despachar los camiones hacia el mercado, a fin de evitar faltantes y no sobrepasar la capacidad de almacenamiento asignada a cada uno de los combustibles.

Sea $QA_{i,p,t}$ una variable continua que representa el contenido de producto p en el “batch” i , disponible en el período t , cuyo valor será positivo

sólo si se cumplen las siguientes condiciones: (i) el lote i contiene producto p ($QP_{i,p} > 0$), y (ii) el lote i termina su descarga desde el poliducto en el transcurso del día t ($r_{i,t} = 1$). Dado que todo lote no-ficticio posee siempre un único producto asignado ($y_{i,p} = 1$, para algún $p \in P$), su tiempo de liberación AT_i debe pertenecer a alguno de los períodos diarios que componen el horizonte ($r_{i,t} = 1$, para algún $t \in T$) de acuerdo con la Ecuación (III.27). Como resultado, sólo una de las variables $QA_{i,p,t}$ vinculadas al lote i será positiva, y las restantes se anularán. Estas condiciones quedan establecidas por el siguiente par de restricciones:

$$\sum_{p \in P} QA_{i,p,t} \leq Q_{\max,p} r_{i,t} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (\text{III.28})$$

$$\sum_{t \in T} QA_{i,p,t} = QP_{i,p} - \sum_{p' \neq p} WIF_{i,p,p'} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (\text{III.29})$$

Si el lote i no es descargado durante el período t , la Restricción (III.28) hace que todas las variables $QA_{i,p,t}$ se tornen nulas. Supongamos ahora que el lote i no contiene producto p . Por lo tanto, según la Restricción (III.8), $QP_{i,p} = 0$. Consecuentemente, la Ecuación (III.29) obliga a ambas variables $WIF_{i,p,p'}$ y $QA_{i,p,t}$ a igualarse a cero. Por el contrario, cuando el producto contenido en el “batch” i es efectivamente la especie p , el volumen útil descargado desde el poliducto se calcula restando del contenido nominal del lote, la fracción correspondiente a la interfase contaminada.

En suma, el inventario de producto p disponible al final del día t en tanques de la estación terminal ($IA_{p,t}$) podrá calcularse mediante la Ecuación (III.30).

$$IA_{p,t} = IA_{p,t-1} + \sum_{i \in I} QA_{i,p,t} - dem_{p,t} - B_{p,t-1} + B_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (\text{III.30})$$

Su valor se determina a partir de sumar al stock disponible en el día previo todo el material descargado desde el poliducto durante el mismo día t , y descontar el despacho diario de combustibles desde los tanques de la terminal, resumidos en el parámetro $dem_{p,t}$. La variable $B_{p,t}$ representa los denominados “backorders” u órdenes incumplidas de producto p que se han comprometido para entrega en el período t , pero por falta de combustibles en tanques serán atendidas en el día $t + 1$. Más aún, el nivel de inventario de cualquier producto p debe mantenerse dentro de un rango admisible dado,

que depende de las capacidades de los tanques de la estación receptora asignados al producto p .

$$(IA_{\min})_p \leq IA_{p,t} \leq (IA_{\max})_p \quad \forall p \in P, t \in T \quad (\text{III.31})$$

De esta forma, es posible planificar el uso de la capacidad de almacenamiento en el centro de distribución de manera agregada, durante todo el horizonte mensual. Más adelante, se propondrán alternativas superadoras a los efectos de considerar mayores detalles del problema para una gestión eficiente de las operaciones en la granja de tanques del centro de recepción.

III.3.5 Función Objetivo

El objetivo del problema consiste en determinar el programa de transporte del poliducto que minimice el costo total de operación, incluyendo: (i) el costo atribuido a la no-utilización del sistema (costo por tiempo improductivo); (ii) el costo de reproceso del material de interfase entre lotes consecutivos ($WIF_{i,p,p'}$); (iii) el costo de mantenimiento del stock de combustibles en tanques de la estación terminal ($IA_{p,t}$); y (iv) el costo de los “backorders” de producto ($B_{p,t}$) despachados al mercado con un día de retraso.

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \rho \left(h_{\max} - \sum_{i \in I^{new}} L_i \right) + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{\substack{i \in I \\ p' \neq p, i > 1}} cf_{p,p'} WIF_{i,p',p} + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} cid_{p,t} (dd_t - dd_{t-1}) IA_{p,t} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} cb_{p,t} B_{p,t} \end{aligned} \quad (\text{III.32})$$

La diferencia entre la amplitud del horizonte de bombeo (h_{\max}) y el tiempo total que insumen las ejecuciones ($\sum_{i \in I^{new}} L_i$) computa el cúmulo de horas que la línea permanece inactiva. En el primer término de la función objetivo, estas horas son pesadas por un costo de penalidad ρ , expresado en unidades monetarias por hora de inactividad. Por su parte, $cf_{p,p'}$ es el costo de reprocesamiento de cada unidad de interfase o mezcla entre productos p y p' , normalmente dado en $[\$/m^3]$, mientras que $ci_{p,t}$ es el costo de mantener en stock un $[m^3]$ de combustible p , durante una hora del período t , expresado en $[\$/m^3.h]$.

Por último, el parámetro $cb_{p,t}$ (en $[\$/m^3]$) representa el costo unitario de atender con tardanza de un día los requerimientos de combustible p establecidos para el período t . Cuando la disponibilidad de combustible p en tanques del centro de distribución es insuficiente para atender la demanda del

período ($dem_{p,t}$) la variable $B_{p,t}$ adopta un valor positivo, igual al volumen que resta ser despachado para cumplir con los compromisos asumidos. No obstante, para los períodos posteriores al cierre del horizonte de planeación, $\{tf1, tf2, \dots\}$, la variable $B_{p,t}$ posee un significado distinto. Durante esos períodos, que abarcan desde el tiempo $t = h_{\max}$ hasta $t = H$, los lotes que han sido inyectados en el horizonte actual, pero que aún permanecen dentro de la línea a tiempo $t = h_{\max}$, se descargan definitivamente en los tanques de la terminal. Con el objetivo de conformar inventarios finales que presenten un perfil similar al patrón de demandas futuras, se incorporan los incumplimientos o “backorders” potenciales de los primeros períodos del nuevo horizonte. Estos se obtienen comparando los inventarios proyectados con el perfil de demanda futura, pudiéndose así minimizar la posibilidad de incumplimientos eventuales. De esta forma se logra inyectar, en la fase final del horizonte vigente, lotes de combustible mejor ajustados al perfil de requerimientos venideros.

III.4 Componentes Adicionales del Problema

Existen dos elementos complementarios del problema, que constituyen componentes críticos de la infraestructura de transporte y distribución de los combustibles, y juegan un rol importante en la operación eficiente de las redes de poliductos: las tareas de aprobación de la calidad de lotes en la terminal de carga, y la gestión de los tanques de almacenamiento. Las terminales de carga o estaciones receptoras funcionan como centros operativos de distribución (“hubs”) donde se consolidan los envíos de combustibles provenientes de diversas unidades de producción, antes de ser despachados hacia otras direcciones o destinos. Dichas terminales poseen un número limitado de tanques, cada uno de los cuales está dedicado al almacenamiento de un combustible específico. Estos se utilizan mayormente para facilitar las operaciones de descarga desde el poliducto y los procedimientos de control de calidad y aprobación de los lotes, pero no como unidades de almacenamiento de largo plazo. Los lotes permanecen dentro de los tanques a la espera de su aprobación durante un tiempo prudencial, que depende del producto involucrado, conocido como “settling period” o período de retención y asentamiento. Habitualmente, este período insume desde algunas horas hasta un día, tiempo durante el cual los envíos no pueden liberarse al mercado. La

Figura III.11 presenta una vista en planta de la terminal de recepción de la empresa CLC (Companhia Logística de Convustíveis) de Portugal.

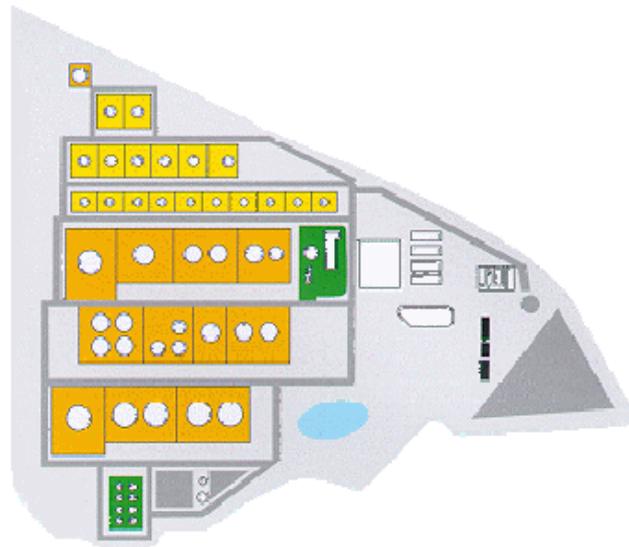


Figura III.11. Vista en Planta de una Estación Receptora (CLC – Portugal)

En estos centros operativos, los “batches” que se descargan desde la línea están dimensionados para colmar la capacidad de los tanques de recepción asignados, y permanecen en su interior hasta el momento en que se completan las tareas de asentamiento y control. Como la terminal posee una capacidad de almacenamiento limitada, la clave para una operación eficiente consiste en optimizar la articulación entre los flujos de ingreso y egreso de combustibles. Un error en la coordinación del sistema puede generar detenciones imprevistas del poliducto, hasta tanto se resuelva el conflicto.

Si los usuarios de la línea requieren almacenar sus combustibles a más largo plazo, deben disponer de instalaciones propias o contratadas, que se abastecen desde la terminal del poliducto a través de tuberías de menores dimensiones.

III.4.1 Nuevas Consideraciones

Partiendo del modelo básico propuesto en las secciones previas, es posible incorporar nuevas restricciones operativas, a los efectos de tener en cuenta el procedimiento de control de calidad de los lotes y así lograr una gestión más eficiente del centro de recepción de los combustibles. Las nuevas hipótesis a tener en cuenta, referidas al control de los lotes, son:

- (1) Luego de finalizar su descarga, todo lote debe permanecer en los tanques asignados de la estación terminal, hasta tanto se complete el proceso de asentamiento y control. La duración de este período depende del producto.
- (2) Durante el período de retención, el lote de producto no está disponible para atender las demandas del mercado. En un instante dado, co-existirán un inventario de combustible p listo para ser entregado, y un volumen adicional en proceso de “settling”.

Además, es necesario incluir nuevos componentes vinculados al manejo de tanques en la estación terminal, los cuales se detallan a continuación:

- (3) El volumen de todo “batch” de combustible transportado a través del poliducto debe coincidir con la capacidad de los tanques asignados para su recepción en la estación terminal.
- (4) Como resultado, todo tanque del centro de recepción puede estar en uno de los siguientes estados: (i) recibiendo un lote y llenándose hasta su máxima capacidad, (ii) completamente lleno y esperando por la culminación del período de “settling”, (iii) listo para atender las demandas del mercado mediante el despacho por camiones, ó (iv) vacío y esperando el arribo de un nuevo lote desde el poliducto.

III.4.2 Reformulación del Modelo

En este apartado se introducen dos de las operaciones críticas de la terminal receptora: (i) un conjunto discreto de tamaños de lote para cada producto, enfocado a una mejor utilización de la capacidad de almacenamiento disponible, y (ii) el período de retención de los lotes, dependiente del combustible transportado. Las nuevas ecuaciones a incorporar en el modelo pueden dividirse en dos bloques: (a) Ajuste del tamaño de los envíos, y (b) Tareas de control y aprobación de lotes.

III.4.2.a Ajuste del Tamaño de los Envíos

En general, cada lote de combustible se dimensiona para completar uno o varios tanques asignados a ese producto en la estación terminal. Como resultado, el tamaño del “batch” no es un valor positivo cualquiera, sino que coincide exactamente con la capacidad de los tanques donde será almacenado. Considerando que cada especie posee un grupo limitado de tanques

disponibles, y que algunos de ellos contienen lotes en períodos de “settling”, puede ocurrir que la terminal no cuente con capacidad suficiente para recepcionar al lote que arriba desde el poliducto, y la operación de bombeo deba interrumpirse. En consecuencia, resulta de suma utilidad considerar este aspecto a los efectos de optimizar las operaciones del sistema.

El objetivo consiste en seleccionar la dimensión de los lotes a partir de un conjunto discreto de tamaños posibles para cada uno de los combustibles transportados. Una formulación eficiente y muy compacta de este problema puede lograrse mediante la combinación de la variable binaria $y_{i,p}$ (selección del combustible) y una nueva variable de decisión $v_{i,s}$, que permite escoger el tamaño s entre los valores posibles para el “batch” i . Las restricciones que definen el tamaño de los lotes vienen dadas por las Ecuaciones (III.33) y (III.34).

$$\sum_{s \in S_p} v_{i,s} = y_{i,p} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (III.33)$$

El conjunto S_p incluye todos los tamaños de “batch” posibles para envíos de combustible p . Si la especie p ha sido asignada al lote i ($y_{i,p} = 1$), debe seleccionarse uno y sólo uno de los tamaños propuestos $s \in S_p$ para envíos de producto p . En otras palabras, solo una de las variables binarias $v_{i,s}$ con $s \in S_p$ será igual a uno, y el resto adoptará valor cero. Si el parámetro b_s mide el volumen de la alternativa s , propuesta para lotes de producto p , entonces la cantidad de producto p transportada en el “batch” i ($QP_{i,p}$) está dada por,

$$QP_{i,p} = \sum_{s \in S_p} b_s v_{i,s} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (III.34)$$

y el tamaño de todo lote inyectado en la línea se ajusta, a través de la propia Ecuación (III.33), a una de las alternativas propuestas,

$$Q_i = \sum_{p \in P} QP_{i,p} = \sum_{p \in P} \sum_{s \in S_p} b_s v_{i,s} \quad \forall i \in I \quad (III.35)$$

Como se ha expresado oportunamente, sólo una de las variables $QP_{i,p}$ para todo producto $p \in P$ debe adoptar un valor positivo, siempre que se trate de un “batch” no-ficticio $i \in I^{new}$. En efecto, la Restricción (III.34) torna redundante la Ecuación (III.8) del modelo original.

III.4.2.b Tareas de Aprobación de Lotes

Antes de liberarse al mercado, los lotes que se descargan desde el poliducto deben permanecer en los tanques de la estación terminal al menos durante el tiempo de retención dado por el parámetro st_p , que depende del combustible p involucrado. A partir de la descarga completa del lote, y durante este período de retención, se desarrollarán las tareas de control de cada envío. Conociendo la cota inferior para el tiempo de arribo de los “batches” (AT_i) dada por las Ecuaciones (III.23) a (III.25), es posible definir el instante de “liberación” del lote i (RT_i), como:

$$RT_i = AT_i + \sum_{p \in P} st_p y_{i,p} \quad \forall i \in I \quad (III.36)$$

De esta manera, a todo lote de combustible que transita por el poliducto puede asignársele un tiempo característico RT_i , denominado instante de liberación del “batch” i , que representa el tiempo más temprano al cual el lote está disponible para despacharse al mercado. Ahora bien, para identificar el período diario en el cual concluye la fase de retención y se libera el lote, es necesario incorporar restricciones análogas a las Ecuaciones (III.26) y (III.27), con una nueva variable de decisión $rs_{i,t}$, que adopta valor unitario siempre que se hayan concluido las tareas de aprobación del lote i durante el día t .

$$\sum_{t \in T} dd_{t-1} rs_{i,t} \leq RT_i \leq \sum_{t \in T} dd_t rs_{i,t} \quad \forall i \in I \quad (III.37)$$

$$\sum_{t \in T} rs_{i,t} = \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I \quad (III.38)$$

El próximo paso consiste en monitorear el inventario de combustible que ya ha completado su fase de retención ($ID_{p,t}$), el cual constituye sólo una fracción del nivel de stock total almacenado en tanques de la terminal ($IA_{p,t}$). Dicho de otro modo, $IA_{p,t} \geq ID_{p,t}$. Para ello, es necesario conocer la cantidad de combustible p contenida en cada lote i que se libera día a día ($QR_{i,p,t}$) para atender las demandas del mercado:

$$\sum_{p \in P} QR_{i,p,t} \leq Q_{\max,p} rs_{i,t} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (III.39)$$

$$\sum_{t \in T} QR_{i,p,t} = QP_{i,p} - \sum_{p' \neq p} WIF_{i,p,p'} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (III.40)$$

Luego, el inventario de producto p que puede despacharse al mercado en el período t ($ID_{p,t}$) se calcula a partir de:

$$ID_{p,t} = ID_{p,t-1} + \sum_{i \in I} QR_{i,p,t} - dem_{p,t} - B_{p,t-1} + B_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (III.41)$$

Mientras que su valor debe mantenerse dentro del rango de niveles de inventario admisibles, dado por:

$$(ID_{\min})_p \leq ID_{p,t} \leq (ID_{\max})_p \quad \forall p \in P, t \in T \quad (III.42)$$

Consideraciones Particulares sobre el Caudal de Transporte. Si todos los combustibles transportados se inyectan y trasladan a través del poliducto con el mismo caudal, la formulación del problema se torna mucho más simple. En primer lugar, vb (sin el subíndice p) denota el caudal de bombeo de la línea, normalmente expresado en [m³/h], y la Ecuación (III.10) se reduce a:

$$L_i = \left(\frac{1}{vb} \right) Q_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (III.43)$$

donde Q_i representa el volumen total de un nuevo lote $i \in I^{new}$, y L_i la duración de la corrida de bombeo asociada. Como resultado, las Ecuaciones (III.23) y (III.24) se simplifican considerablemente, y quedan formuladas ahora en una única restricción.

$$AT_i \geq (C_i - L_i) + \frac{\sigma - F_{i+1}^{(i-1)}}{vb} - H(1 - x_i^{(i)}) \quad \forall i \in I, i < |I|, i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (III.44)$$

En esta expresión, la cota inferior impuesta al tiempo de transporte remanente $G_i^{(i')}$, dada por la Ecuación (III.24), se ha reducido a:

$$G_i^{(i')} \geq \left(\frac{1}{vb} \right) [\sigma - F_{i+1}^{(i-1)}] \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i < i') \quad (III.45)$$

Asimismo, la secuenciación de los tiempos de arribo (Ecuación (III.25)) adopta un formato más sencillo.

$$AT_i \geq AT_{i-1} + L_i \quad \forall i \in I (i > 1) \quad (III.46)$$

En este caso, el último término del lado derecho de la ecuación representa el tiempo preciso que se requiere para impulsar al lote i por completo fuera de la línea, asumiendo que los envíos $(i - 1)$ e i se descargan en el centro de recepción durante la misma corrida, o en corridas sucesivas, pero sin interrupciones en la actividad del poliducto.

Por otra parte, si el caudal de transporte no es un valor fijo, sino que puede ajustarse dentro de un rango operativo dado por $[vb_{\min}, vb_{\max}]$, las Ecuaciones (III.10) deberán reemplazarse por la nueva Restricción (III.47).

$$\sum_{s \in S_p} \frac{b_s}{vb_{\max}} v_{i,s} \leq LP_{i,p} \leq \sum_{s \in S_p} \frac{b_s}{vb_{\min}} v_{i,s} \quad (III.47)$$

Esta expresión unifica el cálculo del caudal de bombeo de todo nuevo lote (Ec. (III.10)) junto con la definición del tamaño del envío de combustible p asociado (Ec. (III.34)). En otras palabras, si el lote i efectivamente se inyecta, y contiene producto p ($y_{i,p} = 1$), deberá adoptar sólo uno de los tamaños $s \in S_p$ impuestos por la Ecuación (III.33). Por lo tanto, para aquel término correspondiente al tamaño de “batch” seleccionado, deberá verificarse que,

$$\frac{b_s}{vb_{\max}} \leq LP_{i,p} \leq \frac{b_s}{vb_{\min}}, \text{ o indistintamente, } LP_{i,p} vb_{\min} \leq b_s \leq LP_{i,p} vb_{\max}.$$

III.5 Caso de Estudio: Compañía CLC - Portugal

A los efectos de analizar el desempeño computacional de la herramienta desarrollada a lo largo de este capítulo, se abordará un caso de estudio real de la industria petrolera, introducido por los investigadores Relvas y colab. en el año 2006. El caso involucra el transporte de seis (6) derivados de petróleo a través de un poliducto troncal que comunica una única refinería con su centro de distribución, próximo a un mercado de consumo masivo de combustibles. Este poliducto unidireccional, con una longitud aproximada de 147 [km], y una capacidad total de 18000 [m³], transporta cuatro combustibles líquidos (P1: Gasoil, P2: Jet Fuel (JP1), P3: Nafta 95, P4: Nafta 98), y dos gases licuados (P5: Butano, P6: Propano). La refinería, el poliducto y el centro de recepción son propiedad de la empresa CLC (Companhia Logística de Combustíveis), de Portugal, la cual opera también la totalidad del sistema de instalaciones (ver Figura III.12). La estación terminal posee tanques de almacenamiento dedicados para cada uno de los combustibles líquidos, y esferas para la recepción de gases licuados. A fin de completar exactamente la capacidad total de uno o más tanques de recepción, el tamaño de los lotes transportados puede seleccionarse de entre un número limitado de opciones, esto es, un máximo de tres tamaños alternativos para cada producto (ver Tabla III.1).

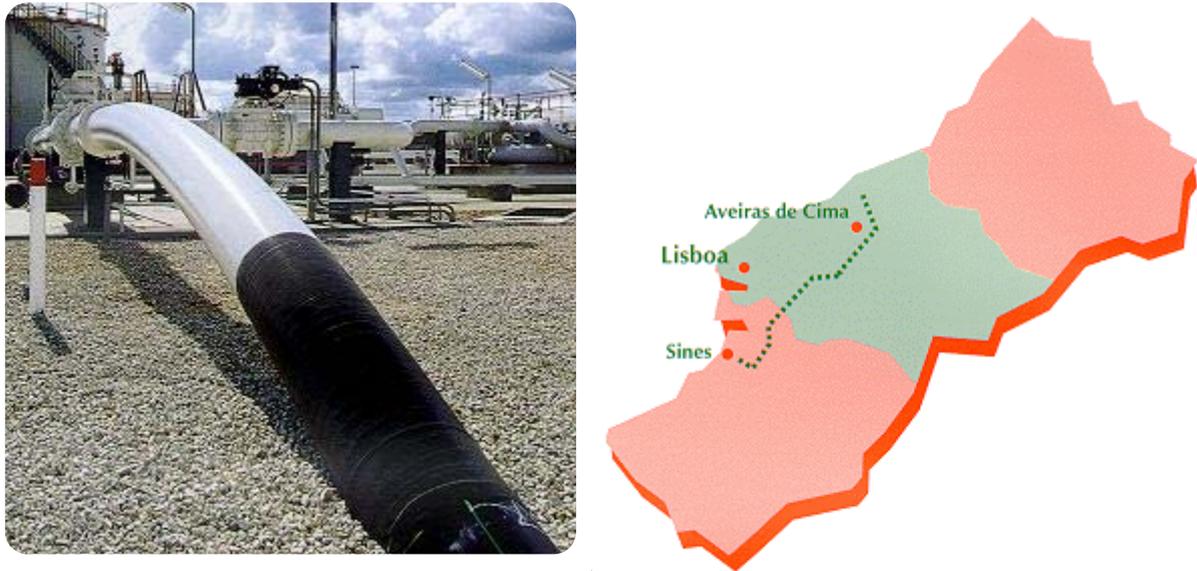


Figura III.12. Poliducto Sines – Aveiras de Cima (CLC – Portugal)

Tabla III.1. Capacidad Máxima de Almacenamiento y Tamaños de Lote Alternativos para Cada Producto

Producto (p)	$ID_{max,p}$ [m ³]	Tamaños alternativos [m ³]		
		Opción 1	Opción 2	Opción 3
P1	81500	21800	18000	17300
P2	32000	16000	8000	--
P3	24000	16000	8000	--
P4	27800	16000	8000	3800
P5	10320	3440	1720	860
P6	13120	6560	4920	8200

Tal como en el caso planteado por Relvas y colab. (2006) el caudal de inyección y transporte de todos los combustibles se supone igual a 519,4 [m³/h]. El objetivo es evaluar el desempeño computacional de la herramienta desarrollada frente a otro método propuesto en la bibliografía. Asimismo, no se han programado periodos de detención de la línea por tareas de mantenimiento, al menos durante el horizonte de planeación actual. Las demandas de los clientes son conocidas por el planificador de la unidad de refino hasta dos semanas antes del comienzo de cada mes. Dado que el centro de distribución en el extremo del poliducto es el mayor destinatario de los combustibles refinados, los requerimientos mensuales de transporte hacia la

estación terminal se incluyen mes a mes en el plan de producción de la refinería. En otras palabras, se supone que existirá siempre en la estación cabecera del poliducto un volumen de productos suficiente para conformar los lotes de transporte planeados. Por lo tanto, no será necesario llevar adelante el control de los niveles de inventario en tanques de la refinería.

Los requerimientos mensuales de cada combustible, y los stocks iniciales disponibles en el centro de distribución se muestran en la Tabla III.2. Por su parte, la Tabla III.3 representa las secuencias de productos permitidas, de acuerdo a la compatibilidad entre las especies. Por ejemplo, el Butano (P5) es el único producto que puede ponerse en contacto con el Propano (P6), mientras que el Gasoil (P1), es el único que puede preceder o suceder a JP1 (P2). No obstante, un lote de P1 puede también ser precedido por lotes de P3 o P4. Además, según fuera descrito por Relvas y colab., el período de asentamiento y control de los lotes en tanques (“settling”) insume 24 horas, para todos los combustibles.

Tabla III.2. Demanda Mensual y Stock Inicial de Cada Producto (en m³)

Producto	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Demanda Mensual (m ³)	198043	64800	14642	68244	10934	16955
Stock Inicial (m ³)	52397	17565	18569	19888	10027	7309

Tabla III.3. Secuencias de Productos Permitidas

	Predecesores Permitidos					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
P1		✓	✓	✓		
P2	✓					
P3	✓			✓	✓	
P4	✓		✓		✓	
P5			✓	✓		✓
P6					✓	

Por otra parte, se supone que las demandas diarias de combustibles se satisfacen al tiempo de inicio de cada uno de los períodos, descargándose del

inventario en forma inmediata. Los requerimientos mensuales reportados en la Tabla III.2 se consideran uniformemente distribuidos a lo largo del horizonte de 31 días (744 horas), con algunas excepciones. En particular, no existen solicitudes de productos P3 y P5 en los fines de semana. Inicialmente, el poliducto se encuentra lleno de combustible P1.

Para la adopción del número de nuevos lotes a impulsar en la tubería (I^{new}), se hará uso de la Ecuación (III.2), ajustada al caso de estudio bajo análisis. Tomando la información de las Tablas III.1 y III.2, es posible deducir que:

$$|I^{new}| = \sum_{p \in P} \frac{1}{\langle b \rangle_p} (\sum_{t \in T} dem_{p,t}) = \frac{198043}{21800+18000+17300} + \frac{64800}{16000+8000} + \frac{14642}{16000+8000} + \frac{68244}{16000+8000+3800} + \frac{10934}{3440+1720+860} + \frac{16955}{6560+4920+8200} = 10,4 + 5,4 + 1,2 + 7,4 + 5,4 + 2,6 = \boxed{32,4}$$

Por lo tanto, el procedimiento iterativo de resolución descrito en la Sección III.3.3, se inicializa con 33 lotes en el primer conjunto I^{new} . Sin embargo, como se verá más adelante, la solución óptima del problema se obtiene con la impulsión de 34 nuevos lotes de combustible a lo largo del mes.

Habitualmente, en sistemas de transporte reales, las secuencias de productos inyectados siguen un patrón cíclico particular. Estas secuencias surgen de enfoques prácticos desarrollados por los planificadores de poliductos, que buscan evitar altos niveles de contaminación entre las especies transportadas. No obstante, la identificación de la secuencia de bombeo óptima es una de las decisiones críticas del problema, y será establecida mediante la resolución del modelo. A los efectos de comparar el desempeño computacional del nuevo enfoque frente a desarrollos previos, se analizarán tres instancias distintas del caso de estudio presentado, que se corresponden con aquellas analizadas por los investigadores Relvas y colab. En adelante se denominan Ejemplos III.1, III.2 y III.3.

En el Ejemplo III.1, la secuencia de combustibles impulsados a través de la tubería se adopta arbitrariamente, según el criterio del planificador, antes de resolver el problema (secuencia fija). Así, el modelo se limita a optimizar el tamaño de los envíos. El Ejemplo III.2 supone que el planificador del poliducto ha fijado un patrón de inyección incompleto, con algunas posiciones “abiertas” a las que puede asignarse alguno de los productos

compatibles alternativos. En este caso, el modelo busca optimizar la selección de especies en la secuencia incompleta, y determinar los tamaños más convenientes para cada uno de los lotes. Por último, en el Ejemplo III.3, la formulación permite establecer libremente la secuencia completa de combustibles a ser inyectados, así como la dimensión óptima de los batches. Cabe aclarar que en el trabajo de Relvas y colab. los criterios de detención del algoritmo MILP fueron: (a) un tiempo máximo de 7200 seg. de CPU, o (b) una tolerancia o “gap” relativo máximo respecto del óptimo de 5%. En los ejemplos resueltos en este capítulo se ha impuesto una tolerancia máxima del 2%.

III.5.1 Ejemplo III.1

En la primera instancia del caso de estudio abordado, la secuencia de especies a inyectar en la línea ha sido definida de antemano por el planificador según su propio criterio. La única decisión del modelo pasa por establecer el tamaño óptimo de cada uno de los lotes impulsados a través del poliducto. El patrón heurístico seleccionado surge de analizar la matriz de compatibilidad entre las especies, presentada en la sección previa (ver Tabla III.3). El único producto compatible con P2 es P1, mientras que P5 es el único que puede entrar en contacto con P6. Así, las secuencias P1-P2-P1, y P5-P6-P5 son dos de las estructuras principales del patrón adoptado. Sin embargo, P1 y P5 (gasoil y butano) son productos cuya mezcla es indeseable, motivo por el cual la única alternativa es interponer en su transición un lote de nafta (P3 o P4). Si se toma en cuenta la predominancia de las demandas de P4 frente a las de P3, entonces puede concluirse que el patrón: P1-P2-P1-P4-P5-P6-P5-P4 constituye una cadena de combustibles lógica, en la cual deberá sustituirse un lote de P4 por uno de P3, cuando los niveles de stock de este último se reduzcan en demasía.

Tal como en el trabajo introducido por Relvas y colab., la resolución del primer ejemplo consiste en imponer la secuencia de combustibles típica que se desprende del párrafo anterior. Si se analiza la primera fila de la Tabla III.4, puede notarse que uno de los lotes de nafta más tardíos de la secuencia, el lote I28, ha sido reservado para el único envío mensual de producto P3. En el resto del programa, la cadena P1-P2-P1-P4-P5-P6-P5-P4 gobierna el funcionamiento del poliducto.

Tabla III.4. Secuencias de Combustibles Adoptadas y Encontradas para los Ejemplos III.1, III.2 y III.3

Posición en la Secuencia																		
Ej.	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18
III.1	P1	P2	P1	P4	P5	P6	P5	P4	P1	P2	P1	P4	P5	P6	P5	P4	P1	P2
III.2	P1	P2	P1	P3	P5	P6	P5	P4	P1	P2	P1	P4	P5	P6	P5	P4	P1	P2
III.3	P1	P4	P1	P2	P1	P4	P1	P4	P5	P6	P5	P4	P1	P2	P1	P4	P1	P2

Posición en la Secuencia																		
Ej.	I19	I20	I21	I22	I23	I24	I25	I26	I27	I28	I29	I30	I31	I32	I33	I34	I35	
III.1	P1	P4	P5	P6	P5	P4	P1	P2	P1	P3	P5	P6	P5	P4	P1	P2	P1	
III.2	P1	P4	P5	P6	P5	P4	P1	P2	P1	P4	P5	P6	P5	P4	P1	P2	P1	
III.3	P1	P4	P5	P6	P5	P3	P1	P2	P1	P4	P5	P4	P1	P2	P1	P4	P5	

El modelo matemático propuesto se ha resuelto de una sola vez, sin la necesidad de aplicar estrategias de descomposición. El proceso de resolución fue implementado en un procesador Intel 2.80 GHz, utilizando el algoritmo GAMS/CPLEX 10.0. Los resultados computacionales que se detallan en la Tabla III.5 incluyen el número de variables binarias y continuas, así como las restricciones individuales que conforman el modelo MILP. Asimismo, se reporta el tiempo de CPU, el número de nodos explorados y la tolerancia relativa al finalizar el procedimiento de búsqueda. También se indica el nivel de utilización porcentual del poliducto en la solución óptima de cada ejemplo.

A modo comparativo, la Tabla III.5 incluye además los resultados reportados por Relvas y colab. para cada uno de los casos. Al evitar el seguimiento del tamaño de los envíos en el tiempo, y haciendo uso de un modelo más eficiente para la gestión de los lotes descargados en la terminal, las restricciones individuales del problema se reducen por un factor de 6,6 y el número de variable binarias involucradas es 2,5 veces menor. Más aún, el problema ha sido resuelto hasta alcanzar un “gap” inferior al 2%, y los tiempos de CPU, comparados con la metodología propuesta por Relvas y colab., han disminuido 16,2 veces, de 355 a 22 seg. Otra mejora significativa es la reducción del tiempo ocioso del poliducto en 15 horas, con el consecuente incremento del nivel de utilización de 96,60% a 98,63%. El mayor uso del sistema responde a una selección más efectiva de los tamaños de lote, y a la posibilidad de alcanzar el óptimo real del problema, reduciendo la tolerancia relativa como criterio de detención.

Tabla III.5. Desempeño Comparativo del Modelo para los Ejemplos III.1, III.2 y III.3, Teniendo en Cuenta los Tiempos de Retención de Lotes (“Settling”)

	Relvas y colab. (2006)		Formulación MILP Propuesta		
	Secuencia Fija	Secuencia Mixta	Secuencia Fija	Secuencia Mixta	Secuencia Libre (por parte)
Restricciones	30703	30703	4659	4667	894 ; 1001 ; 950 ; 1159
Variables Continuas	16259	16259	9945	9945	995 ; 1158 ; 1078 ; 1476
Variables Binarias	4687	4695	1841	1857	292 ; 327 ; 310 ; 397
Tiempo de CPU (s)	355,08	4120,79	21,92	48,89	2,3 + 40,2 + 44,9 + 9,26
No. de Iteraciones (en miles)	60,0	1183,4	62,3	150,2	14,3 + 291,4 + 397,7 + 39,0
Nodos Explorados	150	3200	2248	5335	460 + 17713 + 18981 + 1000
Uso del Poliducto (%)	96,6	96,5	98,6	99,6	99,9
Gap Relativo (%)	4,23	4,63	1,84	0,91	1,55 ; 0,28 ; 0,01 ; 1,88

La Figura III.13(a) ilustra el orden y la duración de las corridas de bombeo para el caso de secuencia fija (Ejemplo III.3), en un diagrama de Gantt convencional. Por otro lado, la Figura III.14 describe la variación de los niveles de inventario de combustibles en tanques de la estación terminal ($IA_{p,t}$) en el tiempo. Una de las diferencias principales respecto de los resultados alcanzados por Relvas y colab. es que la evolución del stock presenta en este caso un comportamiento típico en “dientes de sierra”. Se observa un crecimiento abrupto cada vez que un lote de combustible arriba desde el poliducto, y un consumo progresivo del nivel de combustible en tanques, ocasionado por el despacho habitual de camiones cisterna al mercado.

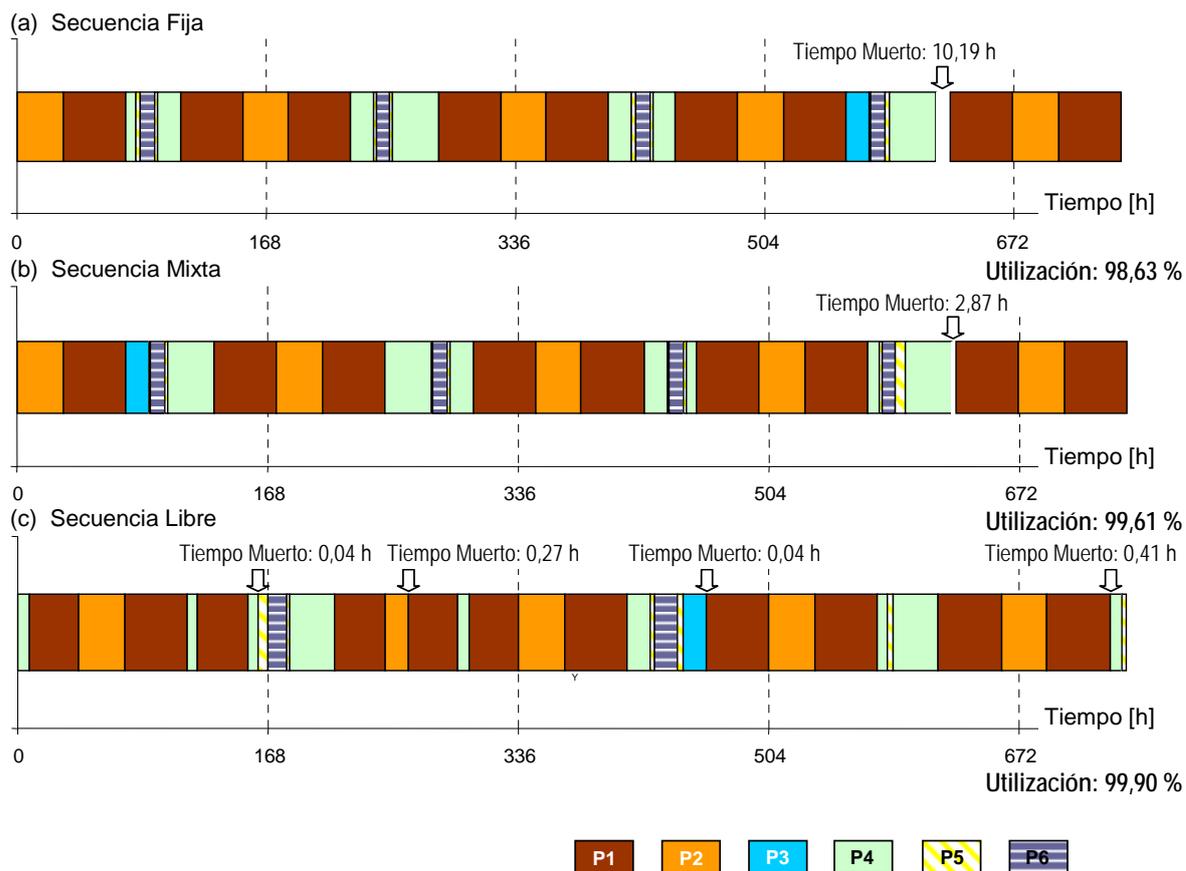


Figura III.13. Secuencias de Productos y Niveles de Utilización del Sistema que Resultan de los Ejemplos III.1, III.2 y III.3

Otro de los objetivos planteados en el nuevo enfoque es la necesidad de contar con inventarios finales que se correspondan con el perfil de demanda típico del mercado. A través de considerar los requerimientos de combustibles para el próximo horizonte en el momento de inyectar los últimos envíos de la secuencia actual, el modelo es capaz de alcanzar una semejanza mucho más ajustada entre los inventarios finales y el perfil de demanda futura (ver Tabla III.6 y Figura III.15(a)). Para ello, se ha supuesto que las necesidades de combustible para el próximo mes son similares a aquellas reportadas en la Tabla III.2, correspondientes al mes actual. La Figura III.15(b) muestra los resultados reportados por Relvas y colab. Al aplicar la metodología propuesta en el presente capítulo, la diferencia entre el perfil de inventario de combustibles y la proyección de la demanda de cada uno de los productos varía entre $-7,69\%$ para P1, y $+4,32\%$ para P2, con una diferencia absoluta promedio de $4,37\%$. Por el contrario, si se analizan los resultados de Relvas y

colab., el intervalo de defasaje está dado por $[-18,72\% ; +11,99\%]$, con un promedio absoluto de 7,26%.

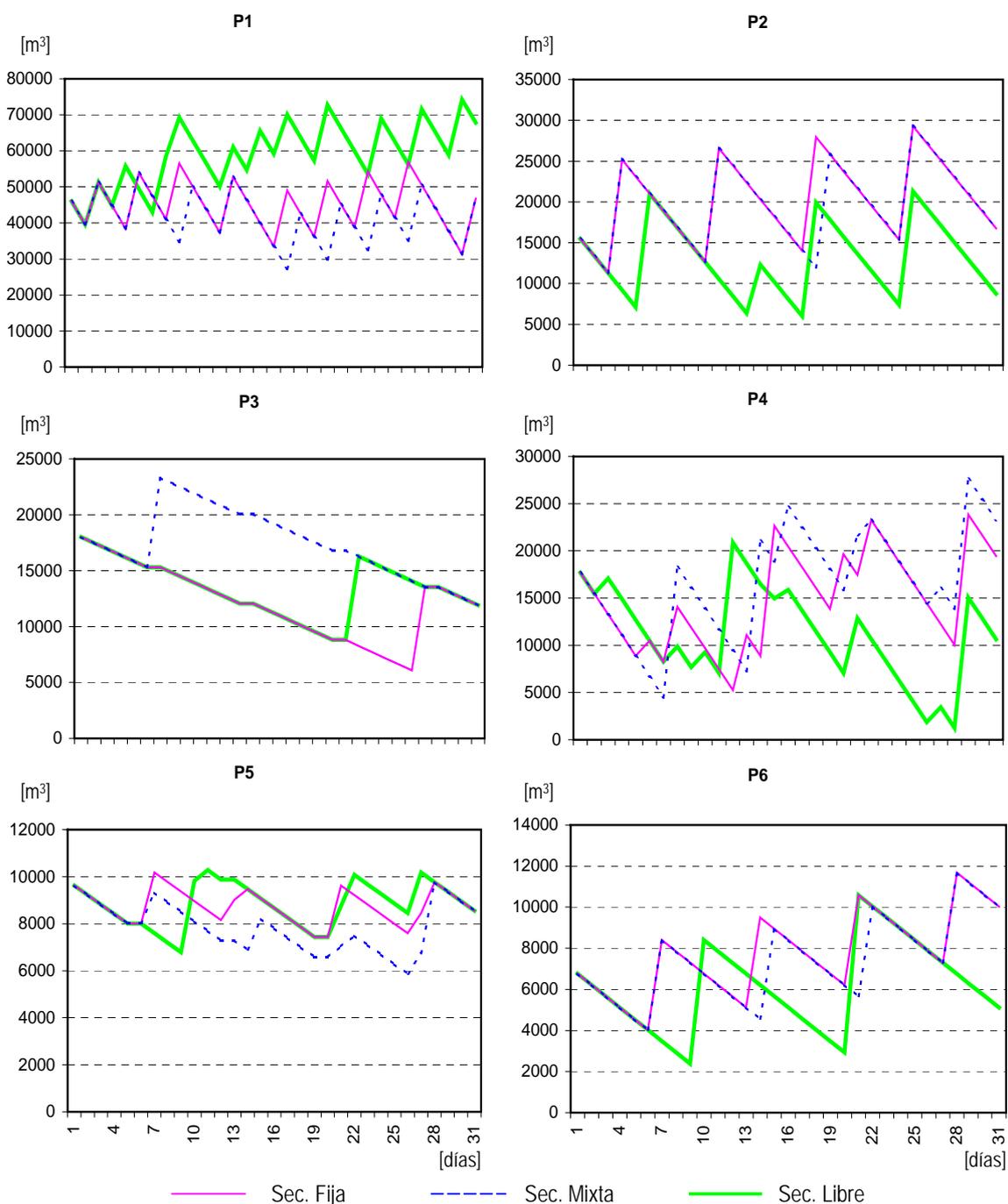


Figura III.14. Evolución de los Niveles de Inventario de Combustibles en Tanques de la Estación Terminal durante el Horizonte de Planeación

Tabla III.6. Desviación entre los Perfiles de Demanda Futura y el Inventario Final de Productos para el Ejemplo III.1

	Demanda Mensual [10 ³ m ³]	Perfil de Demanda (%)	Nuevo Enfoque			Relvas y colab. (2006)		
			Stock Final [10 ³ m ³]	Perfil Stock (%)	Desviación (%)	Stock Final [10 ³ m ³]	Perfil Stock (%)	Desviación (%)
P1	198,0	53,01	68,6	45,32	- 7,69	43,0	34,29	-18,72
P2	64,8	17,34	32,8	21,66	4,32	24,8	19,77	2,42
P3	14,6	3,92	11,9	7,88	3,92	19,9	15,91	11,99
P4	68,2	18,27	19,4	12,85	- 5,41	19,0	15,20	- 3,06
P5	10,9	2,93	8,6	5,65	2,73	8,6	6,83	3,90
P6	17,0	4,54	10,0	6,63	2,09	10,0	8,01	3,47

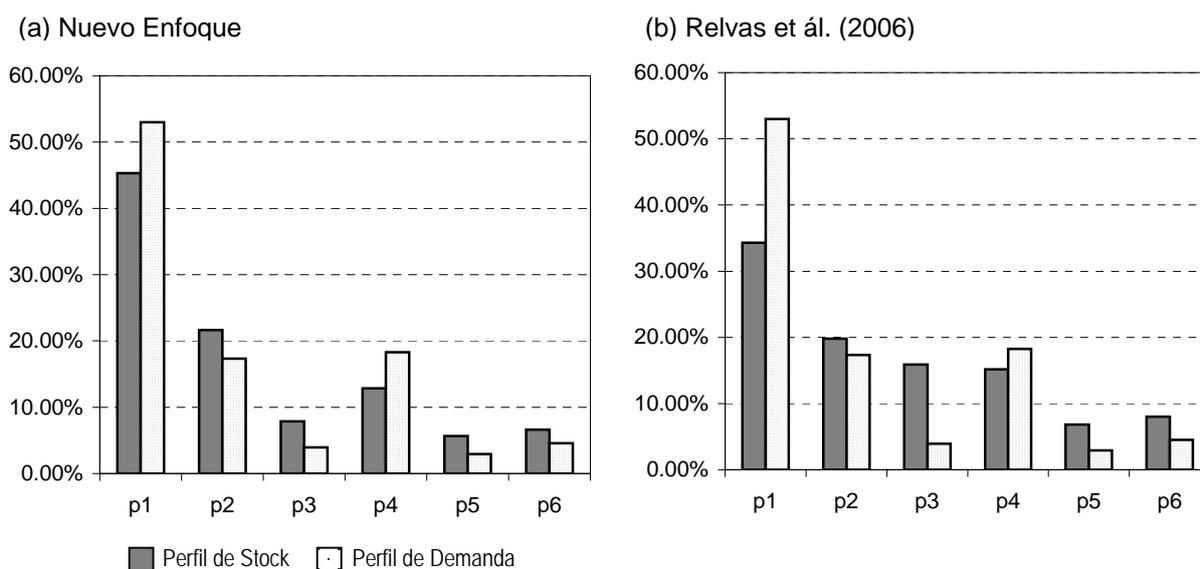


Figura III.15. Desviación entre Perfiles de Inventario Final y Demanda de Combustibles (Caso de Secuencia Fija)

III.5.2 Ejemplo III.2

En la segunda instancia del caso de estudio bajo análisis, la selección de la especie de nafta (producto P3 o P4) a insertar en las posiciones intermedias de la secuencia básica de lotes, se deja en manos del modelo. En este caso se hace referencia a una “secuencia mixta”, ya que parte del patrón de combustibles inyectados está preestablecido por el planificador, y algunas

posiciones libres pasan a ser decisiones del propio modelo de optimización (ver Figura III.16).

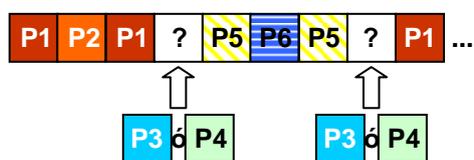


Figura III.16. Secuencia de Combustibles Mixta (Semi-Establecida)

A pesar de que las dimensiones del problema de secuencia mixta se incrementan ligeramente con respecto al Ejemplo III.1, los investigadores Relvas y colab. reportan un tiempo de CPU 11,6 veces más alto, mientras que el número de nodos explorados se multiplica por un factor de 20 (ver Tabla III.5). Por el contrario, el tiempo de CPU requerido y el número de nodos explorados al implementar la metodología propuesta en este capítulo muestran un incremento razonable comparado con el ejemplo de secuencia fija (aproximadamente, se duplican). La comparación de ambas formulaciones aplicadas al ejemplo de secuencia mixta permite concluir que el nuevo enfoque es significativamente más eficiente y robusto. En efecto, el tiempo de CPU requerido disminuye 84 veces, de 4120 a 49 seg., aún cuando la tolerancia relativa del óptimo se reduce a menos de la mitad (ver Tabla III.5).

Al mismo tiempo, la utilización del poliducto en el caso de secuencia mixta se eleva a 99,6%, contra 98,6% obtenido para el Ejemplo III.1, lo cual significa una reducción del tiempo inactivo de la línea de 10,2 h a 2,9 h a lo largo de todo el mes. Estas mejoras se originan en los grados de libertad adicionales del problema (asignación de producto P3 o P4 a las posiciones abiertas) que permiten seleccionar mejores tamaños de lote para cada combustible. La secuencia y duración de las corridas de bombeo, así como el tamaño de los lotes impulsados en el programa óptimo obtenido para el Ejemplo III.2 se muestran en la Figura III.13(b). Pueden observarse dos modificaciones importantes respecto del ejemplo previo: (i) la inyección más temprana del único lote de producto P3, y (ii) el envío de mayores volúmenes de producto P4. Este último cambio está motivado por el incremento en el porcentaje de utilización del sistema. La evolución de los niveles de stock de combustibles en el tiempo ($IA_{p,t}$) presenta en este caso un comportamiento

similar al exhibido en ejemplo anterior (ver línea de puntos en Figura III.14), exceptuando los productos P3 y P4, debido a los cambios en la secuencia antes mencionados. La desviación del perfil de inventarios finales respecto de la demanda futura fluctúa entre $-8,80\%$ para P1, y $+3,78\%$ para P2, con un promedio absoluto de $4,03\%$. Por el contrario, usando modelo de Relvas y colab., el intervalo de desviación del perfil de stock está dado por $[-19,2\% ; +12,3\%]$, con un error medio absoluto de $7,30\%$ (ver Tabla III.7).

Tabla III.7. Desviación entre Perfiles de Demanda Futura e Inventarios Finales Projectados para el Ejemplo III.2

	Perfil de Demanda (%)	Nuevo Enfoque		Relvas y colab. (2006)	
		Perfil de Inventario (%)	Desviación (%)	Perfil de Inventario (%)	Desviación (%)
P1	53,01	44,21	- 8,80	33,81	-19,20
P2	17,34	21,13	3,78	19,82	2,47
P3	3,92	7,69	3,77	15,94	12,03
P4	18,27	14,99	- 3,28	15,56	- 2,71
P5	2,93	5,52	2,59	6,84	3,92
P6	4,54	6,47	1,93	8,03	3,49

III.5.3 Ejemplo III.3

Finalmente, en el caso de secuencia libre, el esquema completo de transporte de combustibles queda en manos del modelo de optimización MILP. Tal como ocurre con las representaciones alternativas, es necesario aplicar técnicas de descomposición del problema, ya que las dimensiones del espacio de búsqueda crecen abruptamente. El horizonte de planeación de 31 días se ha dividido en cuatro períodos: $\{0 - 168\}$, $\{168 - 336\}$, $\{336 - 504\}$, y $\{504 - 744\}$ (en horas), a cada uno de los cuales fue aplicado el modelo propuesto, obteniéndose la solución óptima de cada uno de los subprogramas en forma secuencial, comenzando por el período más temprano. Las condiciones iniciales (contenido del ducto y niveles de inventario en tanques) para cada uno de los períodos están dadas a partir de la solución óptima obtenida para el período precedente. De este modo, puede encontrarse un programa de

bombeo no-cíclico, significativamente distinto al hallado en los Ejemplos III.1 y III.2. No obstante, algunas sub-estructuras de la secuencia libre, coinciden con aquellas fijadas o halladas en los ejemplos previos, tales como (P4-P1-P2-P1-P4) y (P1-P4-P5-P6-P5-P4) (ver Tabla III.4).

A diferencia de la representación de Relvas y colab., para la cual no fue posible encontrar siquiera una solución factible, el nuevo enfoque permite resolver el problema teniendo en cuenta los tiempos de retención de lotes. Más aún, el tiempo total de CPU requerido para la resolución secuencial de los subproblemas, con una tolerancia relativa máxima del 2%, es de tan solo 97 seg. (ver Tabla III.5). Si se analiza la Figura III.13(c), el número de lotes de P1 y P4, es decir de aquellos combustibles con mayor demanda, se incrementa de 10 a 12 y de 7 a 9, respectivamente, disminuyendo los envíos de P5 y P6 en 2. Consecuentemente, el inventario promedio de P1 a lo largo del mes muestra un aumento considerable, mientras que los niveles de combustible P2 en tanques son más acotados. Asimismo, el uso del sistema de transporte se eleva a 99,90%, con respecto a 99,61% del programa de secuencia mixta.

La Figura III.17 describe la evolución de los lotes en tránsito dentro del poliducto, al final de cada una de las corridas de bombeo. La primera línea de la gráfica muestra el contenido inicial del sistema, completamente lleno con producto P1 (18000 m³). En la segunda fila, se ilustra la situación a tiempo $t = 7,32$ h, luego de la primera corrida o ejecución. Como puede observarse, un nuevo lote con 3800 unidades de combustible P4 se ha inyectado en el origen, desde la hora 0,00 hasta la hora 7,32. Como resultado, 3800 unidades del lote de P1 se entregan en la estación terminal, y el contenido del lote I1 dentro de la línea se reduce a 14200 m³. Seguidamente, en la segunda ejecución (tercera línea de la gráfica), se planea la inyección de un nuevo lote de P1 con 17300 m³, desde la hora 7,32 a la hora 40,62. En el extremo opuesto de la tubería, los tanques de la estación terminal almacenan el primer lote completo de P1, y reciben gran parte del segundo lote, que contiene P4. Al final de la campaña, sólo restan 700 unidades de las 3800 originales del lote de P4 por retirar del ducto. Las siguientes líneas en la Figura III.17 muestran el estado del poliducto al concluir cada una de las restantes 32 corridas de bombeo, y el período de inyección de cada nuevo lote. Las dos últimas impulsiones (I34, con 3800 m³ de P4, e I35, con 1720 m³ de P5) permanecen dentro del poliducto al finalizar el plan (hora 744). No obstante, constituyen lotes previstos para atender demandas futuras.

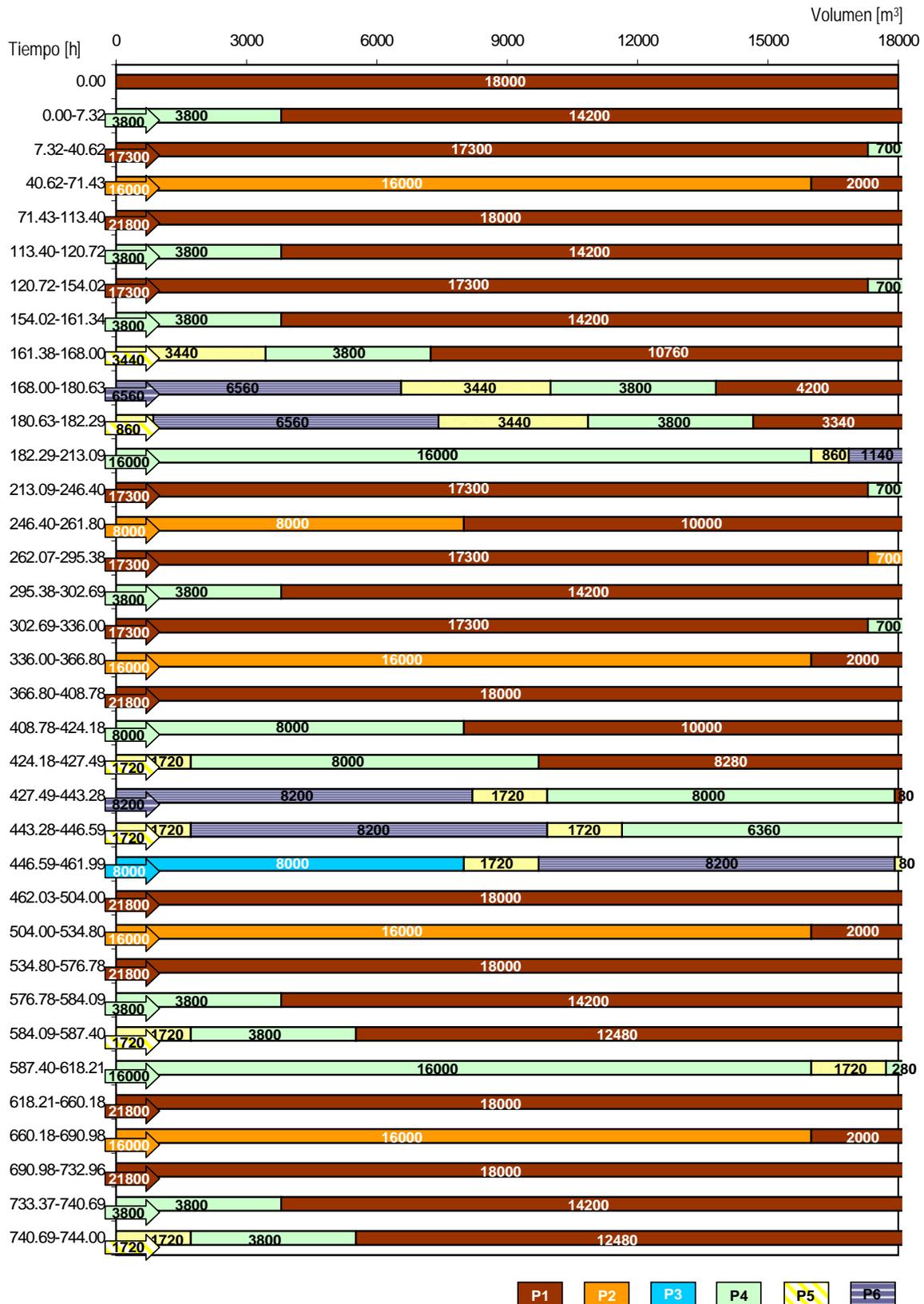


Figura III.17. Programa Óptimo del Poliducto para el Caso de Secuencia Libre

Por otra parte, la Figura III.18 describe el programa de recepción de lotes de combustible P1 en la estación terminal. Es importante notar que no se

presentan solapamientos entre los períodos de retención de los “batches” en tanques. A lo largo de los 31 días que componen el horizonte de planeación, arriban a la terminal once lotes de producto P1. El primero de ellos corresponde a las 18000 unidades que permanecen dentro del poliducto al iniciar el programa de bombeo (lote I1). Además, se reciben cinco lotes mayores, de 21800 m³, y otros cinco más acotados, de 17300 m³.

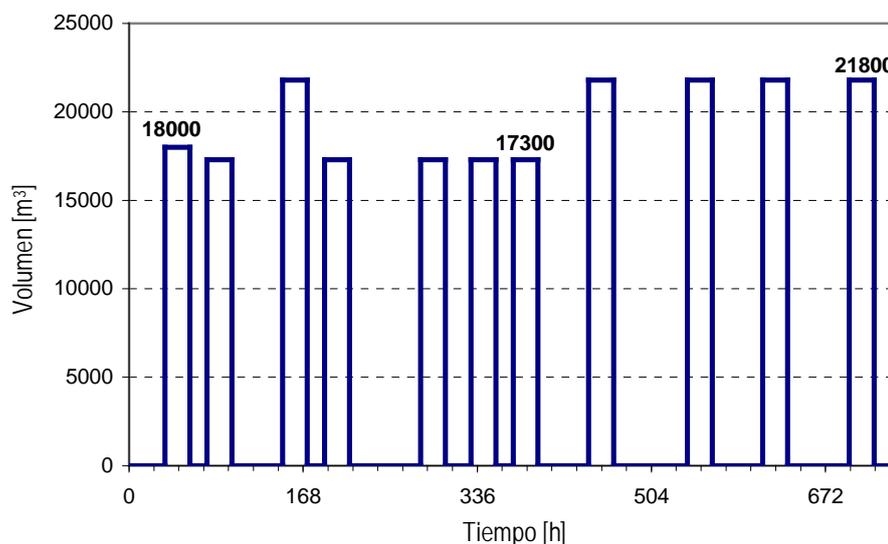


Figura III.18. Programa de Recepción y Control de Lotes de Combustible P1 para el Ejemplo III.3

Para evaluar las ventajas del modelo desarrollado, basta con comprobar que los enfoques previos aplicados al caso de secuencia libre, aun ignorando el período de retención de los combustibles, eran incapaces de encontrar la solución óptima del problema luego de 7200 seg. de CPU. Más aún, para ese caso particular, los investigadores Relvas y colab. describen que recurriendo a una estrategia de descomposición del horizonte temporal en dos períodos, su modelo no puede alcanzar el óptimo de cada subproblema en menos de 3600 seg. La tolerancia o “gap” relativo respecto del óptimo en cada caso se pudo reducir apenas a 6,10% y 9,34%, respectivamente. El hecho todavía más preocupante con relación a los resultados hallados por esos autores es que los niveles de utilización de la línea que resultan de relajar la secuencia de productos son incluso más bajos que los obtenidos con secuencias fijas y mixtas. Claro está que este comportamiento sólo se justifica por los “gaps” excesivos con que debe detenerse el procedimiento de búsqueda. Indudablemente, tal como ocurre al aplicar la herramienta presentada en este capítulo, la utilización porcentual del poliducto en el caso de secuencia libre

debe mejorar el desempeño encontrado para los ejemplos de secuencia restringida.

III.6 Resumen

A lo largo de este capítulo se ha desarrollado una herramienta de máxima eficiencia para la programación de operaciones en un sistema de transporte de múltiples combustibles a través de poliductos simples con origen y destino únicos. El enfoque, basado en un modelo MILP de escala continua, no requiere de la división del contenido del ducto en un número discreto de “packs” de capacidad conocida, facilitando así una representación precisa del funcionamiento real del sistema. El modelo puede ser aplicado a horizontes mensuales de planeación, y permite optimizar las operaciones de transporte, entre las que se incluye la selección del tamaño más conveniente para los envíos de cada combustible, elegido a partir de un conjunto limitado de alternativas. Para una mejor utilización de los recursos de almacenamiento, el modelo supone que el tamaño de todo lote de combustible coincide exactamente con la capacidad total de los tanques donde será almacenado al descargarse de la línea. La herramienta provee la secuencia óptima de inyección y los tiempos de inicio y finalización de cada corrida de bombeo, así como el programa de operaciones de descarga en la terminal de recepción del poliducto. Más aún, es posible manejar un caudal de transporte distinto según la especie inyectada en el origen o cabecera.

Otra característica distintiva del modelo es la gestión eficiente de las operaciones críticas que se desarrollan en el centro de recepción, tales como el proceso de retención y asentamiento, junto con las tareas de control y aprobación de los lotes descargados. La fase de retención se inicia rigurosamente en el momento que finaliza la descarga completa del lote en los tanques de la terminal. La duración de este período puede variar de un producto a otro, según sean las exigencias impuestas por el operador de la línea para corroborar las propiedades físico-químicas del combustible transportado. Mediante la introducción de variables binarias que identifican el período diario en que se produce la liberación de cada lote para atender los requerimientos del mercado, la técnica es capaz de realizar un seguimiento de los stocks de combustible en tanques día a día, no sólo del total de productos descargados, sino también de aquella fracción que ya ha sido aprobada y

puede despacharse al mercado. Un aspecto relevante del modelo propuesto, que origina un aumento importante en el número de variables binarias, es su capacidad para garantizar entregas a la terminal suficientes para cubrir la demanda diaria de los clientes.

Al evitar realizar el seguimiento del tamaño de cada lote a medida que avanza en su recorrido, la complejidad del modelo propuesto se simplifica considerablemente. Esto se justifica dado que el volumen de los envíos no se altera hasta tanto se alcanza la única estación terminal del sistema. No obstante, se lleva adelante un control preciso de la ubicación de los “batches” dentro de la tubería, a los efectos de determinar el tiempo en que el lote arriba a la terminal y se completa su descarga. De este modo, el número de restricciones y variables involucradas en el modelo se mantiene acotado. La nueva representación del problema es significativamente más simple que la propuesta previa publicada en la literatura. En consecuencia, la herramienta demuestra un desempeño computacional mucho más eficiente, y los tiempos de resolución se reducen hasta dos órdenes de magnitud.

Mediante la aplicación del modelo matemático propuesto, se ha logrado resolver un caso de estudio real de la industria petrolera, que involucra el transporte de seis combustibles a través de un poliducto simple desde una refinería hacia su principal centro de distribución. Asimismo, se han evaluado tres escenarios distintos, con niveles de complejidad creciente: (a) Secuencia de Lotes Fija o Preestablecida, (b) Secuencia de Lotes Incompleta o Semidefinida, en la cual se presentan ciertas posiciones abiertas para la selección del combustible más apropiado, y (c) Secuencia Libre, en la que el modelo configura el patrón acíclico de bombeo óptimo. En todos los casos, la formulación propuesta encuentra la solución óptima del problema con un costo computacional mucho menor que el enfoque previo. Al abordar la instancia de secuencia libre, el número de restricciones del modelo disminuye aproximadamente 17 veces, las variables binarias involucradas decrecen en un orden de magnitud, y el tiempo de CPU se reduce por un factor cercano a 100, aun cuando el enfoque alternativo ignora el procedimiento de control de los lotes descargados. Más aún, el porcentaje de utilización del poliducto se incrementa al 99,9% para el caso de secuencia libre, y los niveles de inventario proyectados se ajustan con precisión al perfil de demanda de los combustibles en el mercado, previniendo así la posibilidad de retrasos o “backorders” en la atención de requerimientos futuros. No obstante, dadas las dimensiones del

problema, la resolución del programa de secuencia libre requirió la aplicación de estrategias de descomposición del horizonte.

Finalmente, el enfoque desarrollado permitió planificar el uso de la capacidad de almacenamiento de la estación terminal sobre un horizonte mensual, a nivel agregado. Luego de alcanzar el plan óptimo de transporte y gestión de los envíos, debe generarse un programa detallado de operaciones a nivel de tanques individuales. Para garantizar la existencia de un programa detallado factible, es conveniente reservar un porcentaje de la capacidad disponible para cubrir requerimientos particulares de almacenaje y control de lotes. Una de las herramientas más adecuadas para llevarlo a cabo la ofrecen los modelos de simulación del transporte y distribución de combustibles por poliductos. Este tópico constituye una de las líneas actuales de mayor desarrollo en el área.

Capítulo IV

Planeación del Transporte por
Poliductos con un Único
Origen y Múltiples Terminales
de Recepción

IV.1 Introducción

Las mayores ventajas asociadas al transporte por poliductos resultan del reducido nivel de daños que sufre el producto durante el traslado, los enormes ahorros vinculados a la economía de escala, y la ausencia de contenedores para trasladar la carga, evitándose así la necesidad de retornar el contenedor vacío, como ocurre con todos los demás medios alternativos (Trench, 2001). Además, el movimiento del producto está mucho menos expuesto al nivel de tráfico y a las condiciones climáticas, a diferencia de lo que sucede con el transporte por buques-tanque, sus competidores directos. Sin embargo, constituyen la alternativa más lenta, con velocidades que oscilan entre 5 y 15 km/h, lo que exige la máxima precisión a la hora de programar sus operaciones.

En general, el transporte de los combustibles combina una primera instancia de traslado a través de una tubería troncal o principal, desde la refinería a los centros de carga, seguida por un sistema de reparto de menor escala, normalmente a cargo de camiones cisterna, que distribuyen los productos desde cada terminal de recepción del poliducto hacia los clientes o usuarios finales. Más aún, el movimiento de combustibles desde la refinería hacia una terminal de distribución distante puede involucrar a más de una compañía operadora de poliductos. En muchos casos, estos sistemas de transporte pertenecen a un grupo de empresas petroleras, que comparten su utilización (“common-carriers”).

Es evidente que la programación del transporte de múltiples combustibles a través de poliductos es una tarea sumamente compleja, con un gran número de restricciones a tener en cuenta. En el capítulo previo, se ha presentado una herramienta eficaz para la resolución del programa de transporte en tuberías con origen y destino únicos, basada en un modelo de representación MILP de escala continua. Dado que gran parte de los sistemas de transporte por tuberías poseen más de un único destino, en el presente capítulo del trabajo se verá el modo de extender el modelo matemático propuesto a poliductos de transmisión que conectan una única fuente o refinería con múltiples centros de distribución a lo largo del trayecto.

En la última década, se ha publicado un número importante de trabajos acerca de la operación de sistemas de transporte por ductos con múltiples destinos. En su mayoría, estos desarrollos están basados en modelos MILP discretos de gran escala, restringidos a horizontes estáticos de

unos pocos días de duración, pues su eficiencia computacional disminuye marcadamente con la extensión del plan. Más aún, las técnicas reportadas en la literatura se han limitado a ejemplos sencillos, que asumen escenarios de demanda estáticos, en horizontes compuestos por un único período y una única fecha de entrega (“due-date”) al final del mismo. Por el contrario, como se ha planteado en capítulos previos, los operadores de poliductos suelen abordar horizontes mensuales, divididos en un número fijo de períodos, aplicando estrategias de programación cíclica de operaciones para cumplir con las demandas del mercado antes de la finalización de cada período. Asimismo, la reasignación de cargas a destinos (“rerouting”) y los cambios frecuentes en los requerimientos de combustibles por parte de las terminales de recepción, obligan al programador a actualizar periódicamente el plan de transporte. En este contexto, la posibilidad de resolver el mismo problema a través de modelos eficientes de escala continua abre enormes posibilidades a la hora de abordar casos de estudio con horizontes más extensos y niveles de demanda variables en el tiempo.

Para afrontar estos grandes desafíos que plantea la industria del petróleo moderna, el presente capítulo presenta una estructura de representación dinámica del programa de operaciones del poliducto, basada en un modelo MILP de escala continua, e implementada sobre un horizonte rodante compuesto de múltiples períodos. En el momento que se completa el plan de transporte para el período actual, el programador incorpora un nuevo período al final del horizonte, y se inicia así el proceso de reprogramación de las operaciones del poliducto basado en datos actualizados de demandas para los próximos períodos del horizonte. Usualmente, la secuencia de inyección de “batches” se modifica de una instancia a otra del plan, y las corridas de bombeo pueden extenderse durante dos o más períodos. El modelo se ha aplicado con éxito a un problema real que involucra el transporte de cuatro combustibles en estado líquido, desde una refinería o fuente a cinco destinos, sobre un horizonte rodante que comprende cuatro períodos semanales.

Programación del Despacho de Combustibles a Múltiples Destinos

La programación de poliductos que abastecen de combustibles a múltiples terminales desde una única refinería (ver Figura IV.1) ha recibido un interés creciente por parte de los investigadores del área en la última década. En general, los clientes o usuarios del poliducto contactan al transportista u

operador de la línea para colocar sus órdenes de traslado (llamadas nominaciones) correspondientes al próximo mes. Una vez que se acepta el pedido, el usuario debe entregar a tiempo el lote de combustible en la estación cabecera, y disponer de suficiente capacidad de almacenamiento en la terminal receptora para descargarlo. Una práctica habitual en la planeación de estos sistemas es instar a los usuarios a emitir sus nominaciones antes del día 25 del mes previo. Por ejemplo, el día 25 de enero es la última fecha posible para solicitar los traslados de combustible de todo el mes de febrero.

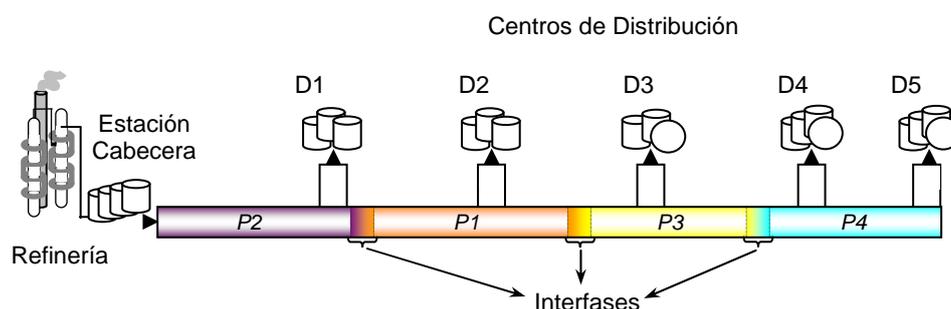


Figura IV.1. Poliducto con Múltiples Terminales Receptoras

A partir de entonces, el planificador desarrolla una agenda o “schedule” mensual de actividades de bombeo y distribución. Para ello, divide el horizonte en períodos o ciclos, cuya duración puede variar entre 7 y 14 días, constituyendo así un horizonte multi-período. De la misma forma, las órdenes de los clientes se dividen en tantas partes como ciclos contenga el mes, realizándose la entrega de cada parte antes de la finalización de cada ciclo. En otras palabras, la programación cíclica de envíos es una técnica aproximada que suele aplicarse a estos sistemas, suponiendo que el perfil de demanda anticipado en las terminales se mantendrá constante en cada uno de los ciclos. Cuando se completa la inyección o bombeo de una secuencia de productos, otra secuencia idéntica comienza a impulsarse (Sheppard, 1984). Si un poliducto opera en ciclos de 14 días, el sistema debe disponer de tanques de almacenamiento que puedan contener lotes de combustible cuyo tamaño equipare las demandas de esos 14 días. En ciclos semanales, en cambio, las necesidades de almacenamiento se reducen a la mitad, pero el volumen de las interfases generadas en el mes se duplica. De este modo,

puede observarse con claridad un “trade-off” o situación de compromiso difícil de resolver. Los costos asociados al inventario de combustible en tanques se reducen a expensas de un incremento considerable en los costos de degradación de los productos. Por otro lado, si las órdenes exceden la capacidad de bombeo del sistema, el planificador debe decidir cuáles nominaciones se reducen, en un proceso denominado “apportionment”, que normalmente se desarrolla a través de reglas heurísticas (Hull, 2005).

Una vez desarrollado el programa de bombeo se lo transfiere a los despachantes de envíos o “dispatchers”, quienes ejecutan las operaciones de carga, transporte y descarga de los lotes en forma remota y totalmente automatizada, a través de sistemas computarizados que se instalan en una sala de control central. Mediante la utilización de un Sistema Supervisor de Control y Adquisición de Datos (SCADA) se estima el instante preciso de arribo de los lotes a cada terminal, al tiempo que se registra el tamaño y localización de los envíos dentro de la tubería. Esto es posible gracias a la información proveniente de los detectores de interfases que se disponen a lo largo del trayecto, facilitando la transferencia de combustible a uno o varios centros de recepción. De esta manera, se monitorea en forma permanente la evolución de los “batches” y la posibilidad física de abastecer de combustible a los tanques de una terminal, verificando que el lote haya alcanzado la posición correcta dentro de la tubería (Rabinow, 2004).

Cuando un lote arriba a una terminal de distribución y no se está en condiciones de recibirlo, ya sea por falta de capacidad en los tanques o por algún otro inconveniente, la línea de transporte debe detenerse de inmediato. Por consiguiente, tal como ocurre en la práctica, una buena representación del problema debería ser capaz de proyectar el avance progresivo de los lotes dentro de la línea, de forma tal de establecer: (i) el tiempo más temprano al que puede iniciarse la descarga de un “batch” a la estación receptora, y (ii) el intervalo de tiempo durante el cual el lote tiene acceso a los tanques de la terminal. Además, según se ha expresado, las terminales del poliducto disponen de unos pocos tanques con el solo fin de facilitar las operaciones de carga/descarga, y no pueden ser utilizados como unidades de almacenamiento de largo plazo. Por ende, la clave para una gestión eficiente del sistema en su conjunto consiste en coordinar los flujos de ingreso y egreso de combustible en cada uno de los tanques de las diferentes terminales. La escasez de combustible en la estación cabecera, o la falta de capacidad libre en tanques

de las terminales de destino obligan a detener inesperadamente la línea, lo cual resulta en costos significativos asociados al reinicio de las operaciones.

Desafíos de un Entorno Dinámico

La mayor parte de los modelos de representación del problema de programación de poliductos han adoptado un horizonte temporal estático, en el cual toda la demanda de combustibles se concentra hacia el final del período. Uno de los grandes desafíos que se ha planteado desde entonces es la necesidad de contemplar horizontes de planeación extendidos, con múltiples fechas de entrega o “due-dates” para los combustibles en cada uno de los destinos. A medida que el tiempo transcurre, los usuarios del sistema emiten nuevas órdenes de transporte, y la información utilizada para configurar el plan de bombeo va modificándose durante su desarrollo. Como resultado, el programa de envíos debe actualizarse periódicamente. Por un lado, pueden aparecer órdenes adicionales para el mes en ejecución, mientras otras solicitudes se cancelan o se modifica el destino del combustible, aún cuando los “batches” ya han sido inyectados y transitan por la tubería. El programador del poliducto no sólo planifica sino también revisa los planes con cierta frecuencia, ajustándolos a las necesidades dinámicas de los clientes, sin perder de vista el objetivo de máxima eficiencia en la operación del sistema. Se dice que el re-direccionamiento o “rerouting” de los envíos es la práctica más habitual en tuberías multi-producto (Sheppard, 1984).

Otro factor de máxima complejidad es el tiempo de transporte. Existe una demora significativa, que puede variar entre 3 y 10 días, desde el comienzo de la inyección de un lote hasta el instante en que el mismo se descarga en la estación de destino. Este tiempo depende de las dimensiones de la tubería y de la localización de cada depósito a lo largo del trayecto. Si el horizonte de planeación es más corto que el tiempo promedio de traslado, la mayor parte de las demandas de combustibles serán atendidas con el inventario inicial disponible en tanques de la terminal de distribución, o con el material que transita por el poliducto al iniciarse el plan. Ésta es la razón por la cual la inyección de nuevos lotes en horizontes de muy corto alcance persigue el único objetivo de desplazar a los “batches” previamente inyectados hacia sus destinos, sin tener en cuenta que el material introducido deberá corresponderse con el perfil de demanda futura. Este fenómeno se conoce habitualmente con el nombre de “efecto de fin de horizonte”. Como

consecuencia directa, las últimas inyecciones de combustible suelen no tener relación alguna con la demanda a atender en el horizonte actual, ni con las proyecciones de requerimientos futuros. Más aún, no es difícil deducir que de implementarse el programa, la disposición final de combustibles dentro de la línea no permitirá atender en tiempo y forma las demandas de combustibles en algunas terminales, durante los tramos iniciales del nuevo horizonte de programación. La actualización del plan de bombeo a partir de la nueva información de demanda conducirá a obtener entonces una secuencia de inyección particularmente distinta a la obtenida mediante un enfoque estático.

IV.2 Caracterización del Nuevo Enfoque

Comúnmente, los operadores logísticos de poliductos desarrollan un programa de bombeo de duración mensual, y las demandas de traslado de combustibles se atienden antes de la finalización de cada semana. Por el contrario, las técnicas publicadas en la literatura para sistemas de múltiples destinos consideran horizontes estáticos mono-período, con una única “due-date” al final del plan. Para sortear esta limitación, en el presente capítulo se introduce un modelo MILP de tiempo continuo, extendido a tuberías con más de un destino y múltiples “due-dates”, en un entorno de condiciones dinámicas. Las operaciones del poliducto se programan para un horizonte de longitud fija compuesto por múltiples períodos. El programa de transporte debe visualizarse como una agenda flexible, en la cual sólo las tareas planeadas para el primer período del horizonte (llamado período de acción) son implementadas. Para el resto del horizonte, las decisiones se revisan en cada instancia de reprogramación. Asimismo, el nuevo enfoque contempla órdenes semanales distintas pactadas con cada uno de los clientes, sin necesidad de subdividir el total de la demanda en ciclos idénticos con igual secuencia de productos y tamaños de “batches”.

En el enfoque dinámico, la información sobre nuevas solicitudes de transporte, cancelación de órdenes ya emitidas, cambios en los destinos de algunos lotes, actualización de los planes de producción de la refinería, así como los niveles de inventario de combustible en la estación cabecera y en las terminales de carga, se incorporan al problema a medida que el horizonte “rueda”. Al abordarse un horizonte multi-período de extensión fija, cada vez que transcurre un período se incluye otro nuevo al final del horizonte, en

reemplazo del primer elemento de la instancia anterior. No obstante, la longitud del horizonte debe ser lo suficientemente extensa como para que la información de demanda correspondiente al nuevo período agregado no afecte las decisiones clave vinculadas al nuevo período de acción.

A partir de la información actualizada del problema, las operaciones de transporte de la línea se reprograman de forma óptima a través de la resolución del modelo matemático propuesto. De este modo, va generándose una agenda dinámica de distribución que semana a semana ejecuta el despachante. Los resultados provistos por el programa incluyen: (a) la secuencia de productos y los tiempos actualizados de cada corrida de bombeo, (b) los despachos de combustible a cada destino desde la línea durante cada ejecución (lote de procedencia, tipo y cantidad de combustible), (c) la ubicación y el tamaño de cada lote que transita por el poliducto, antes y después de toda nueva ejecución, y (d) los stocks proyectados en la refinería y en los tanques de los depósitos al finalizar la inyección de un nuevo “batch” en el ducto.

Tal como se podrá observar en los resultados proporcionados por este nuevo enfoque dinámico, suelen ocurrir cambios sustanciales en las últimas ejecuciones del plan previstas para los últimos períodos del horizonte actual. Las modificaciones se presentan a causa de los requerimientos adicionales de combustible por parte de los usuarios, incorporados al final del nuevo horizonte, y de la inyección anticipada de combustibles en el poliducto, a raíz del tiempo significativo que insume su traslado. En consecuencia, el programa de bombeo que finalmente ejecuta el despachante difiere en forma notoria respecto de aquél que se obtendría si se usara un horizonte estático. Cabe aclarar que la metodología propuesta a lo largo de este capítulo es aplicable a cualquier sistema o red de distribución de combustibles por ductos, aunque en este caso será aplicada a una tubería multi-producto que une una estación cabecera con múltiples terminales receptoras.

IV.3 Definición del Problema

Dados:

- (a) Un poliducto unidireccional que comunica una única estación cabecera con múltiples terminales receptoras, a través de tuberías de igual o diferente diámetro. A menudo, el diámetro del ducto se reduce a lo largo del recorrido.

- (b) La capacidad de los tanques disponibles para cada uno de los combustibles en el origen y en los diferentes destinos.
- (c) Un horizonte de planeación multi-período, que comprende N intervalos de igual o distinta duración.
- (d) El conjunto de solicitudes de transporte (nominaciones), cada una de las cuales incluye el volumen de un dado producto disponible en el origen del sistema, a ser trasladado hacia alguna de las terminales receptoras.
- (e) Las fechas de entrega pactadas al final de cada período del horizonte. Diferentes órdenes de transporte podrían solicitar el despacho del mismo combustible hacia la misma estación terminal, pero en distintas fechas.
- (f) La secuencia de lotes disponibles en el interior de la tubería al inicio del horizonte, así como su contenido y localización en el ducto.
- (g) El programa de producción de la refinería de origen, o alternativamente, la agenda de alimentación de los tanques de combustible en la estación cabecera.
- (h) Los inventarios de productos a tiempo cero, tanto en la refinería como en los depósitos.
- (i) El rango admisible del caudal de transporte a través del poliducto, y el caudal máximo de despacho de productos al mercado, desde cada terminal.
- (j) La frecuencia de regeneración del programa de bombeo con información actualizada, cada vez que el horizonte “rueda” en el tiempo. Usualmente, el proceso de reprogramación se ejecuta al inicio de todo nuevo período.

El objetivo del problema consiste en establecer, en forma dinámica, la secuencia y el volumen de los lotes de combustibles a introducir en la línea a lo largo del horizonte, de modo tal de: (1) atender la demanda de productos en el tiempo pactado, (2) conservar el nivel de stock de productos en tanques de origen y destino dentro del rango permitido, (3) realizar un seguimiento preciso de los lotes a medida que transitan por la línea, y (4) minimizar la suma de los costos de bombeo, transición, detención del sistema, retrasos en las entregas, y mantenimiento de combustibles en inventario. El programa de transporte

debería indicar el tipo y la cantidad de combustible a inyectar, el caudal de bombeo asociado, así como los tiempos de inicio y finalización de cada corrida.

IV.4 Hipótesis de Trabajo

Para lograr extender el modelo de representación a un sistema de transporte con múltiples destinos, se han considerado válidas las siguientes suposiciones:

- (1) El poliducto permanece lleno de combustibles en todo momento. Bajo la hipótesis de incompresibilidad de los líquidos a presiones de trabajo normales, la única forma de descargar una unidad de producto en alguna de las terminales es mediante la inyección de un volumen equivalente en el origen del sistema.
- (2) La línea opera en modo fungible o consolidado. Si dos lotes individuales de una misma especie de combustible comparten las mismas especificaciones, pueden combinarse en un único envío.
- (3) Cada envío consolidado puede tener más de un destino. A medida que se introducen nuevos lotes en la estación cabecera, una porción o “corte” de un “batch” en tránsito puede despacharse al destino asignado, mientras el volumen restante avanza hacia puntos más alejados. En la práctica, esta operación se conoce como “corte” o “stripping” de los lotes.
- (4) Los “batches” que conforman envíos consolidados pueden ser reasignados en forma dinámica a diferentes destinos. En el proceso de revisión periódica del programa, la reasignación de los lotes en tránsito permite modificar el destino del combustible transportado, en función de las prioridades de cada destinatario.
- (5) La solicitud de combustible en una terminal de distribución puede atenderse con material proveniente de uno o más lotes.
- (6) Los “batches” de combustible se introducen en la tubería en forma secuencial sin dispositivos físicos de separación, y se transportan en régimen turbulento para reducir la extensión de las interfases.
- (7) El volumen de producto-mezcla entre dos combustibles distintos contenidos en lotes consecutivos se supone constante, de valor

conocido e independiente del caudal de bombeo y de la distancia recorrida. Las interfases se mantienen dentro de la tubería hasta que alcanzan la coordenada final del trayecto (último depósito) donde se reprocesan o se redireccionan hacia la refinería, por vías de retorno alternativas. De retirar el volumen interfacial en depósitos intermedios, se volverían a generar nuevas mezclas, posiblemente incompatibles.

- (8) Una fracción de lote puede entregarse a la terminal receptora sólo si: (a) el lote ha arribado al punto del trayecto en el cual existe conexión física al destino asignado, y (b) hay capacidad de almacenamiento libre para recibir el lote. De no disponer de capacidad de almacenamiento suficiente, la línea de transporte debe detenerse hasta tanto se resuelva el inconveniente.
- (9) El costo unitario de bombeo es una constante conocida, que varía con el producto y con el trayecto recorrido, pero es independiente del caudal de transporte. En capítulos previos se ha discutido en detalle la validez de esta suposición.
- (10) La velocidad de producción de combustibles en la refinería es siempre menor que el caudal de inyección al ducto. Si la tubería es utilizada por más de un centro de refino, se supone que los lotes se encuentran disponibles en la estación cabecera al momento de iniciar las corridas de bombeo correspondientes. En los ejemplos abordados, la tasa de producción es de 500 m³/h, mientras que el caudal de inyección de los combustibles, en un poliducto de 20" de diámetro, es superior a los 800 m³/h.
- (11) Al utilizar una estrategia de programación acíclica, sobre un horizonte rodante, la secuencia de operaciones puede modificarse de un período al siguiente.
- (12) En cada instancia del proceso de programación, el tiempo presente es el inicio del primer período del nuevo horizonte. Los despachos programados para dicho período (período de acción) son los únicos que se ejecutan, mientras que los restantes serán revisados en la próxima iteración. Como resultado, sólo pueden aceptarse nuevas órdenes para períodos posteriores al primero.

- (13) El tiempo de transporte de un lote puede tomar hasta dos semanas, desde que se inyecta hasta que se entrega la última fracción (“lead-time”). Es indispensable que la duración del horizonte exceda con holgura el tiempo de transporte de los lotes. Caso contrario, los productos introducidos en el período de acción podrían no tener destino asignado.

IV.5 Modelo de Representación

IV.5.1 Estructura Principal del Modelo

La formulación matemática del problema de planeación dinámica de poliductos se define en términos de cuatro conjuntos principales: (a) los lotes de combustible transportados ($i \in I = I^{old} \cup I^{new}$), (b) las terminales de recepción del poliducto ($j \in J$), (c) los combustibles a ser abastecidos a través del poliducto ($p \in P$), y (d) los períodos de tiempo que componen el horizonte rodante de planeación ($t \in T$). Tal como en el modelo presentado en el capítulo previo, los lotes contenidos en el conjunto I^{old} constituyen aquellos envíos disponibles en la tubería al momento de planificar las operaciones, mientras que los elementos restantes ($i \in I^{new}$) son “batches” a impulsar en corridas de bombeo homónimas, durante el horizonte futuro. Se supone que los elementos del conjunto I están ordenados cronológicamente, de modo que los lotes de partida (I^{old}) preceden a los lotes futuros (I^{new}). Así, el primer elemento de I^{old} representa el lote más alejado de la refinería dentro del poliducto al iniciarse las operaciones, y el último elemento en el mismo subconjunto constituye el “batch” más próximo, recientemente inyectado. En forma análoga, el primer elemento en el conjunto I^{new} será el primer envío a ser impulsado durante el horizonte actual. Además, la introducción de todo nuevo lote i en la línea deberá comenzar después de haber concluido la inyección previa ($i - 1$). Como el número óptimo de nuevos lotes se desconoce de antemano, es necesario proponer un conjunto I^{new} lo suficientemente amplio, sin sobredimensionar el modelo. En secciones siguientes se abordará un criterio útil para estimar el valor de $|I^{new}|$.

En resumen, el desafío planteado en este nuevo capítulo consiste en incorporar el conjunto J a la formulación de escala continua, el cual comprende múltiples centros de recepción a lo largo del trayecto. De este modo, podrá contemplarse la posibilidad de entregas “al paso” u operaciones

de “stripping”, en las cuales parte de un lote consolidado se deriva a una estación de carga, mientras la fracción restante avanza hacia destinos más alejados. El seguimiento de los lotes dentro de la tubería se torna un problema ciertamente complejo.

IV.5.1.a Características de los Lotes Transportados

Todo nuevo lote $i \in I^{new}$ que se planea inyectar en la línea durante el horizonte a programar, está caracterizado por las siguientes propiedades:

- (a) El producto contenido (variable binaria $y_{i,p}$)
- (b) El volumen inyectado (Q_i)
- (c) El tiempo de inicio de la inyección ($C_i - L_i$)
- (d) El tiempo final de la inyección (C_i)
- (e) La duración de la corrida de bombeo asociada (L_i)
- (f) El período de tiempo al cual se completa la ejecución (variable binaria $w_{i,t}$)

Estos atributos pueden considerarse como propiedades *estáticas* de los lotes transportados, pues su valor no se modifica con la actividad del poliducto, esto es, con la inyección de nuevos lotes. Las restricciones que modelan las propiedades estáticas de los “batches” se denominan “*ecuaciones de definición de lotes*”. Su estructura principal coincide con aquella presentada en el capítulo precedente, por tratarse de condiciones vinculadas a la operación de una cabecera única. Entre ellas se cuentan: la definición del volumen interfacial entre lotes consecutivos, la secuencia de ejecuciones y la adopción del caudal de transporte de cada lote. Por otra parte, es importante identificar el período de tiempo en el que concluye cada corrida, de modo de verificar si el combustible transferido puede contarse como material disponible para atender demandas en ese período. Si bien una ejecución $i \in I^{new}$ culmina dentro de un período t , la misma puede haber comenzado en un período anterior ($t' < t$). De esta manera, el modelo incluye un conjunto global de ejecuciones para todo el horizonte, sin necesidad de recurrir a una partición por período. Como resultado, el número inicialmente propuesto para $|I^{new}|$ resulta muy razonable, manteniendo acotadas las dimensiones del modelo.

IV.5.1.b Seguimiento de los Envíos y Despachos a las Terminales

Algunas otras características de los “batches” dependen de la actividad del poliducto, y su valor puede modificarse a lo largo del horizonte, cada vez que un nuevo lote se introduce en la línea. En adelante, se denominan propiedades *dinámicas* de los lotes. En tal sentido, los tiempos de culminación de las ejecuciones constituyen los eventos más importantes del modelo, en los que ha de calcularse el valor de cada una de esas variables. Entre ellas es posible identificar la coordenada de localización de los lotes en tránsito ($F_i^{(i')}$), una variable ya utilizada en el modelo previo. No obstante, el abordaje de poliductos con múltiples destinos exige el seguimiento preciso del tamaño de cada lote en el tiempo, representado por la nueva variable continua $W_i^{(i')}$ (contenido volumétrico del lote i al culminar la ejecución i' , con $i' \geq i$).

A medida que un envío avanza dentro de la tubería, puede ir entregando parte de su contenido a los depósitos a los que tiene acceso, modificando las propiedades dinámicas a las que se hizo referencia. Para conocer el instante en el cual un lote arriba a su destino, y la cantidad de producto que podrá ser entregada, debe llevarse adelante un control riguroso de los movimientos de los envíos y de los despachos a terminales. El seguimiento de los “batches” implica registrar el valor que toman estas variables, en cada evento temporal $C_{i'}$. Además, es necesario instruir a los despachantes sobre las operaciones de corte o “stripping” de “batches” en tránsito durante una nueva ejecución (intervalo $[C_{i'} - L_{i'} ; C_{i'}]$). Las restricciones vinculadas al control de los envíos en el tiempo se denominan “*ecuaciones de seguimiento de lotes*”, e involucran las siguientes variables:

- (a) La coordenada volumétrica del lote $i \in I$ dentro del poliducto al finalizar la ejecución $i' \geq i$, es decir, en el instante $C_{i'}$, representada por $F_i^{(i')}$.
- (b) El tamaño del lote al tiempo $C_{i'}$, dado por $W_i^{(i')}$.
- (c) El volumen de material transferido desde el lote i a la terminal j durante el intervalo $[C_{i'} - L_{i'} ; C_{i'}]$, representado por $D_{i,j}^{(i')}$.
- (d) El acceso del lote i a la terminal j durante el intervalo $[C_{i'} - L_{i'} ; C_{i'}]$, controlado por la variable binaria $x_{i,j}^{(i')}$.

A diferencia del modelo propuesto para poliductos con destino único, las restricciones de seguimiento de lotes involucran a la variable binaria $x_{i,j}^{(i')}$, que cuenta con el índice adicional j (destino). El objetivo es establecer si la entrega de material desde el lote i al depósito j es una operación factible, y

tiene lugar durante la inyección del nuevo lote i' ($i' \geq i$). Para ello, el lote deberá haber alcanzado (y no sobrepasado) el punto de derivación al depósito j , antes o durante el intervalo de tiempo $[C_i - L_i ; C_i]$. En tal circunstancia, se verifica $x_{i,j}^{(i')} = 1$.

La Figura IV.2 muestra una secuencia de cuatro “batches”: $I = \{B4-B3-B2-B1\}$ con productos $\{P1-P3-P4-P2\}$, respectivamente, que permanecen dentro de la tubería antes de impulsar el “batch” $i' = \{B5\}$. En la misma figura se explicitan los valores que adoptan las variables $x_{i,j}^{(i')}$ y $W_i^{(i')}$, antes y después de la inyección del “batch” $B5$.

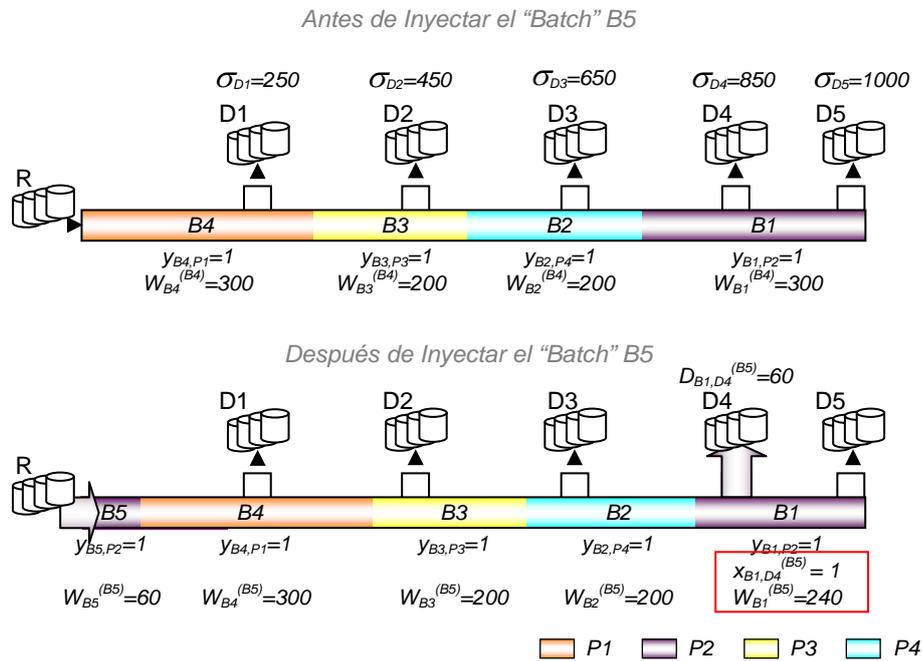


Figura IV.2. Ejemplo Sencillo que Ilustra el Significado de las Principales Variables del Modelo

Es importante distinguir aquellos lotes que por su localización tienen acceso a cada una de las terminales, durante la inyección del lote $B5$: $B1$ a $D4$ y a $D5$, $B2$ a $D3$, $B3$ a $D2$, y $B4$ a $D1$. No obstante, sólo la variable $x_{B1,D4}^{(B5)}$ adopta valor unitario, pues constituye la única transferencia efectiva de material. Como resultado, una fracción del lote $B1$ (con producto $P2$), equivalente al volumen del “batch” $B5$, es transferida a tanques de la terminal $D4$. Como el tamaño original de $B5$ es de 60 unidades, el contenido del lote $B1$ disminuye en la misma cantidad, es decir: $W_{B2}^{(B4)} - W_{B2}^{(B5)} = 300 - 240 = 60$. Además, los tamaños de los lotes $B2$, $B3$ y $B4$ no presentan modificaciones: $W_{B2}^{(B5)} = W_{B2}^{(B4)} = 200$, $W_{B3}^{(B5)} = W_{B3}^{(B4)} = 200$, $W_{B4}^{(B5)} = W_{B4}^{(B4)} = 300$.

IV.5.1.c Stock de Combustibles en Depósitos y Nivel de Despachos al Mercado

Como se ha expuesto, la falta de capacidad suficiente para recibir un lote en las terminales de carga provoca la detención inmediata de la línea, generando costos operativos excesivamente altos. Por consiguiente, el modelo de programación de poliductos debe ser capaz de monitorear los niveles de stock de cada uno de los combustibles en los tanques de las estaciones receptoras, de modo de evitar: (i) transferencias de material a depósitos que causen la sobrecarga de los tanques, y (ii) despachos de combustibles al mercado desde terminales que no disponen de stock. El control de los niveles de inventario de los depósitos implica conocer el volumen de cada combustible almacenado en tanques, en cada evento de tiempo $C_{i'}$ (con $i' \in Inew$). Más aún, los despachos de combustible hacia el mercado (en general, por medio de poliductos laterales o camiones cisterna) deben programarse de tal forma de cumplimentar a tiempo la demanda de cada una de las semanas que componen el horizonte, evitando costos de “backorders” o retrasos. Todas estas consideraciones se incluyen en la sección “ecuaciones de gestión de stock en depósitos”, e involucran las siguientes variables adicionales del modelo:

- (a) El nivel de inventario de producto p en el depósito j al tiempo $C_{i'}$, representado por $ID_{p,j}^{(i')}$.
- (b) La cantidad de producto p transferida desde el lote i hacia el depósito j durante la inyección i' , dada por $DP_{i,j,p}^{(i')}$.
- (c) El volumen de combustible p abastecido al mercado desde la terminal j durante el intervalo $[C_{i'-1}; C_{i'}]$, representado por $DM_{p,j}^{(i')}$.
- (d) La demanda insatisfecha o “backorder” de producto p para el depósito j comprometida para entrega en el periodo t , y relegada para el periodo siguiente ($B_{p,j,t}$).

Tal como se ha planteado, la variable binaria $w_{i',t}$ permite establecer el período t durante el cual se completa la corrida de bombeo i' . De esta manera, la cantidad total de producto p despachada desde el depósito j al mercado, hasta el instante de finalización del período t , puede calcularse a partir de los despachos $DM_{p,j}^{(i')}$ realizados durante las ejecuciones i' previas al cierre del período t . Por su parte, la variable continua $B_{p,j,t}$ representa la fracción de demanda de combustible p que se debía abastecer desde la terminal j antes de la finalización del período t , y que por falta de material en tanques los despachos correspondientes se retrasan para períodos posteriores.

IV.5.1.d Programa de Producción en Refinería

En aquellos poliductos operados por la misma compañía de refino que produce los combustibles, debe llevarse un control riguroso de los niveles de combustible en tanques de la estación cabecera. Normalmente, el programa de producción de los combustibles se define con antelación, y el plan de transporte a través del poliducto debe ajustarse a las condiciones que el mismo impone. Antes de comenzar una corrida de inyección de combustible en la línea debe asegurarse la disponibilidad de material suficiente en los tanques de la estación cabecera. Caso contrario, deberá retrasarse su inicio hasta tanto se complete una campaña de producción del mismo combustible en la refinería del sistema. Asimismo, para evitar que los tanques de la estación de origen se vean colapsados, deberá preverse el transporte inmediato de lotes de ciertos productos, cuando el volumen abastecido desde la refinería comprometa la capacidad máxima disponible para su almacenamiento. Con este objetivo, las llamadas “*restricciones de control de stock en refinería*” se incorporan al modelo de planeación de poliductos, de modo de coordinar el programa de inyección de combustibles en la línea con el programa de producción de la destilería.

IV.5.1.e Condiciones Iniciales

Por último, se cuenta con información acerca del tamaño y la ubicación de los lotes inyectados en el horizonte previo, los cuales permanecen dentro de la línea en el instante $t = 0$. Éstas constituyen las “*condiciones iniciales*” del problema.

IV.6 Formulación Matemática del Problema

IV.6.1 Restricciones de Definición de Lotes

Asignación de Combustible. Todo lote, de ser inyectado en la línea, contiene un único combustible. Luego,

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (IV.1)$$

Los lotes ficticios, cuya inyección no forma parte del programa óptimo, presentan $y_{i,p} = 0, \forall p \in P$.

Secuencia de Ejecuciones. La impulsión de un nuevo “batch” $i \in I^{new}$ dentro de la tubería debe comenzar una vez completada la inyección del lote previo ($i - 1$), y la consecuente operación de transición o “changeover”, que depende de la secuencia de productos bombeados.

$$C_i - L_i \geq C_{i-1} + \tau_{p,p'} (y_{i-1,p'} + y_{i,p} - 1) \quad \forall i \in I^{new}; p, p' \in P \quad (IV.2)$$

$$L_i \leq C_i \leq h_{max} \quad \forall i \in I^{new} \quad (IV.3)$$

En estas restricciones, C_i es el tiempo de culminación de la corrida $i \in I^{new}$, L_i su duración, y h_{max} representa la extensión total del horizonte. El parámetro h_{max} es la suma de las duraciones de todos los períodos que componen el horizonte rodante de planeación. La Restricción (IV.2) se torna activa sólo en caso que los lotes ($i - 1$) e i contengan productos p' y p , en ese orden. Para todo par de lotes no ficticios ($i - 1, i$), sólo una de las Ecuaciones (IV.2) vuelve positivo el último término, contemplando así el tiempo de transición entre ambas impulsiones. La Figura IV.3 describe un horizonte de tiempo compuesto por un único período semanal de 168 horas. A tiempo $t = 0$ comienza el bombeo del “batch” $B1$, hasta la hora $C_1 = 24$ h, esto es, una corrida de duración $L_1 = 24$ h. Seis horas más tarde se da inicio al bombeo del lote $B2$, hasta la hora $C_2 = 58$ h, siendo $L_2 = 28$ h.

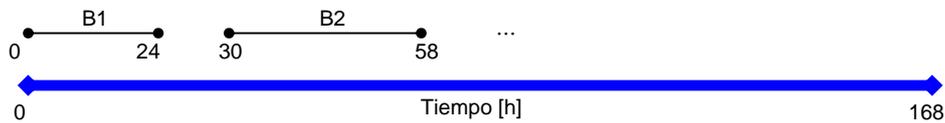


Figura IV.3. Secuencia de Inyección de Lotes

Tamaño de un Lote a Inyectar y Duración de la Corrida de Bombeo Asociada. Si Q_i es el volumen original del lote i introducido en el poliducto, la duración (L_i) de la corrida de bombeo durante la cual se inyecta debe satisfacer la siguiente condición:

$$vb_{min} L_i \leq Q_i \leq vb_{max} L_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (IV.4)$$

De esta forma, es posible asegurar que el caudal de inyección de los “batches” se mantiene dentro del rango de valores admisibles, dado por el intervalo $[vb_{min}, vb_{max}]$. Además, la duración de una corrida de inyección (L_i) deberá alcanzar el valor mínimo impuesto $l_{min,p}$, y no superar el valor máximo dado

por $l_{\max,p}$, siempre que el lote sea efectivamente impulsado y contenga producto p . Si se trata de un lote ficticio ($\sum_p y_{i,p} = 0$), la Ecuación (IV.5) hará que L_i adopte un valor nulo.

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} l_{\min,p} \leq L_i \leq \sum_{p \in P} y_{i,p} l_{\max,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (IV.5)$$

La Figura IV.4 ilustra un programa de inyección de combustibles en el origen del poliducto, que involucra la impulsión de cuatro lotes: $B1$, $B2$, $B3$ y $B4$, en ese orden.

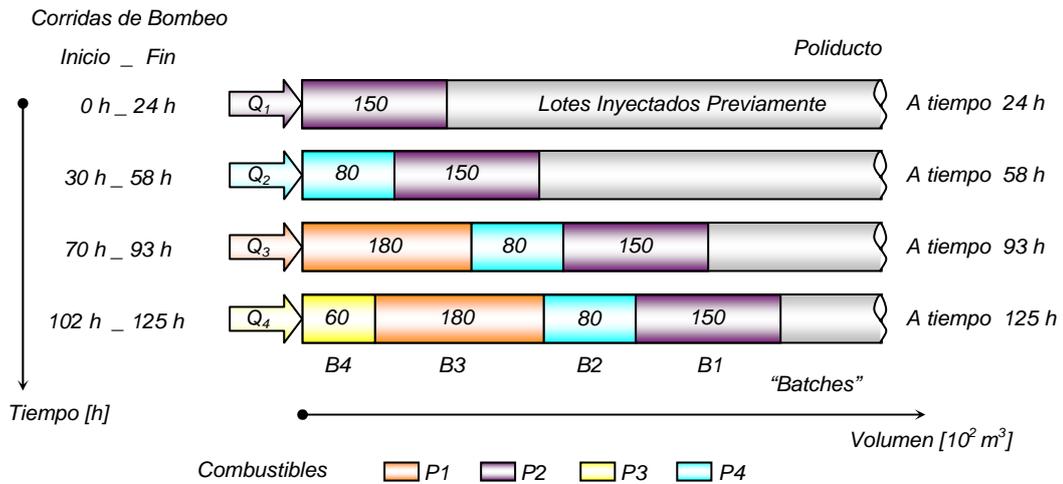


Figura IV.4. Representación Simple de un Programa de Operaciones de Bombeo

Cada línea del diagrama representa la disposición de lotes dentro de la tubería al tiempo de culminación de una corrida de bombeo. Se supone que el caudal de impulsión debe mantenerse dentro del rango: $2,50 \leq vb_i \leq 8,00$; medido en cientos de m³ por hora. El primer envío de la secuencia es $B1$, con 150 unidades (10² m³) de producto $P2$, el cual se introduce en el poliducto desde la hora 0 hasta la hora 24, a un caudal promedio de 6,25 unidades por hora. El segundo lote ($B2$) está conformado por 80 unidades de $P4$, impulsadas desde la hora 30 hasta la hora 58, a un caudal de 2,86 unidades por hora. Posteriormente, $B3$ involucra la inyección de 180 unidades de combustible $P1$ desde la hora 70 hasta la hora 93, a un caudal de 7,83 unidades por hora, mientras $B4$ transporta 60 unidades de $P3$, que parten de la estación cabecera desde la hora 102 hasta la hora 125, a razón de 2,61 unidades por hora.

Para acelerar el procedimiento de búsqueda de soluciones, los lotes ficticios se relegan hacia el final de la secuencia de lotes inyectados, a través de la Ecuación (IV.6). Si NR es el número de corridas efectivas del programa óptimo, los últimos $[|I^{new}| - NR]$ elementos del conjunto I^{new} constituyen lotes ficticios, que no se introducen en la línea durante el horizonte actual.

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (IV.6)$$

Volumen de Interfase entre Lotes Consecutivos. Por definición, el lote $(i - 1) \in I$ se ha introducido en la línea inmediatamente antes de la impulsión del lote $i \in I$. Tal como se ha planteado, el uso de separadores físicos entre combustibles no es una práctica conveniente, exceptuando algunos casos puntuales. Por ende, ha de generarse entre ambos lotes un volumen de producto-mezcla indefinido, cuya extensión no podrá ser inferior que el parámetro $IF_{p,p'}$, cuando los envíos $(i - 1)$ e i transporten productos p y p' , respectivamente (ver Figura IV.5). La interfase entre los lotes $(i - 1)$ e i es una pequeña fracción del lote i ubicada en su extremo más alejado del origen, que será apartada en la última estación receptora del ducto. Al igual que en el modelo presentado en el capítulo previo, el tamaño de la interfase o “transmix” entre productos se supone independiente del caudal de transporte y de las detenciones de la línea. Sin embargo, a diferencia de los modelos de optimización basados en estructuras discretas, el presente enfoque de naturaleza continua es capaz de distinguir y monitorear las interfases, desde el origen hasta la última terminal del sistema.

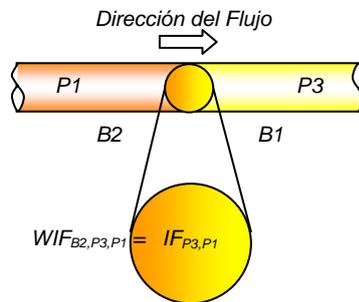


Figura IV.5. Material de Interfase entre Lotes B2 y B1

Como el material de interfase reduce el contenido efectivo de un lote, y su reprocesamiento insuere un costo relativamente alto, proporcional al

volumen de producto-mezcla degradado, una y sólo una de las Ecuaciones (IV.7) se cumplirá como igualdad estricta en el óptimo, para todo lote i transportado.

$$WIF_{i,p,p'} \geq IF_{p,p'} (y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1) \quad \forall i \in I, i > 1, p, p' \in P \quad (IV.7)$$

La incorporación de las variables $WIF_{i,p,p'}$ para el par de combustibles $p \neq p'$ puestos en contacto, permite determinar el volumen de producto p en el lote i que se debe descontar del contenido original, por haberse degradado en la interfase con el lote previo ($i - 1$). Si el objetivo del problema es minimizar el volumen total de interfases, sin distinguir entre las especies, los subíndices correspondientes a los productos pueden ignorarse, y la variable $WIF_{i,p,p'}$ se reemplaza por WIF_i en la Ecuación (IV.7). Por otro lado, una de las hipótesis del modelo establece que el combustible-mezcla no se transfiere a los depósitos intermedios. Por el contrario, permanece en el interior de la tubería hasta que alcanza la coordenada final del poliducto, donde se aparta y almacena en tanques especiales de segregación (Rejowski y Pinto, 2003). Cuando la última fracción no-contaminada de un lote se extrae en una terminal intermedia, la interfase que la antecede permanece dentro de la línea, actuando como separador o “plug” entre envíos que pudieran ser incompatibles. La Figura IV.6 ilustra un caso en el cual el lote completo de producto $P1$ (“batch” $B2$), destinado a la terminal $D1$, se descarga íntegramente desde el poliducto durante la inyección del lote $B3$. No obstante, la interfase con el lote previo ($B1$), que transporta combustible $P2$, permanece dentro de la línea, evitando el contacto directo del lote $B1$ con el lote $B3$. La decisión de conservar la interfase $B1-B2$ dentro del ducto es sumamente acertada, ya que los productos $P2$ (“batch” $B1$) y $P3$ (“batch” $B3$) son incompatibles entre sí, y no deberían mezclarse.

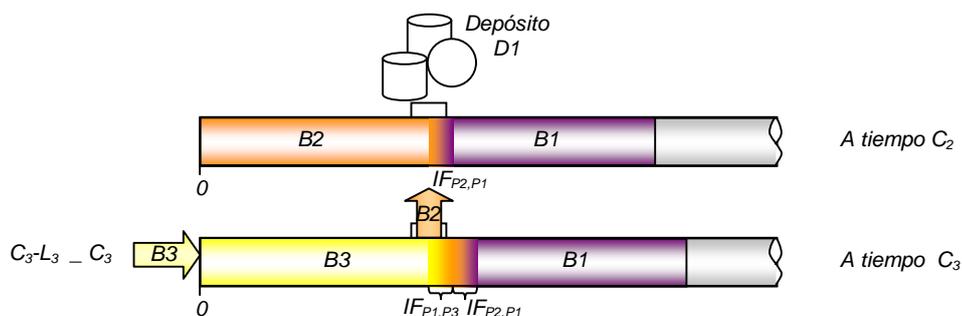


Figura IV.6. Manejo de Interfases en Estaciones Intermedias

Secuencias Incompatibles. A causa de la contaminación indeseada de ciertos combustibles, algunas secuencias o transiciones entre productos están prohibidas. Si $p - p^*$ constituye una secuencia de productos inadmisibles, no podrán inyectarse en forma sucesiva lotes de combustible p y p^* , en ese orden. Luego, debe incorporarse al modelo la siguiente condición:

$$y_{i-1,p} + y_{i,p^*} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new}, (p, p^*) \text{ incompatible} \quad (IV.8)$$

Consumo de Energía en Horas Pico. En sistemas de transporte impulsados por motobombas eléctricas, los operadores suelen evitar la actividad de las estaciones de bombeo en horas pico de demanda energética, con mayores precios de la energía eléctrica, para reducir los costos asociados. Si bien la capacidad límite de transporte de una línea puede calcularse a partir de multiplicar el caudal máximo de bombeo (vb_{\max}) por la duración del horizonte (h_{\max}), una parte de esa capacidad debería reservarse, de modo de evitar el accionamiento de las bombas en períodos de alto costo energético. Si hw_{\max} es el tiempo operativo normal de la línea a lo largo del horizonte, descontando la duración total de los períodos pico de demanda eléctrica, entonces deberá imponerse al sistema operar como máximo un tiempo igual o menor que hw_{\max} excepto en aquellos casos en los cuales, para cumplir con los compromisos de entrega, convenga operar PH horas adicionales en períodos de alto costo energético, pagando por ello un costo relativamente alto:

$$\sum_{i \in I^{new}} Q_i \leq vb_{\max} (hw_{\max} + PH) \quad (IV.9)$$

donde $PH \leq h_{\max} - hw_{\max}$.

Períodos de Inyección de cada Lote. La formulación dinámica propuesta está diseñada para contemplar múltiples fechas de entrega o “due-dates” a lo largo del horizonte. Supongamos que el horizonte de planeación está compuesto por múltiples períodos ($t \in T$), de igual o diferente duración, de modo que las fechas de entrega pactadas para todas las órdenes de traslado coinciden con el instante de finalización de cada período. Es decir, el parámetro dd_t resulta igual a la fecha de culminación del período t . Con el objeto de establecer si cada despacho de combustible desde el poliducto respeta el tiempo de entrega pactado, es importante reconocer el período durante el cual se completa la transferencia de material. Tal como fuera mencionado, la variable $D_{i,j}^{(i)}$ representa la cantidad de combustible contenido

en el lote i que se entrega al depósito j durante la ejecución i' . Más precisamente, el volumen $D_{i,j}^{(i')}$ estará disponible en tanques de la estación terminal a la hora $C_{i'}$. Si la ejecución (o inyección) del “batch” i' finaliza dentro del período t , significa que $C_{i'}$ pertenece al intervalo $[dd_{t-1}; dd_t]$. Por lo tanto, el volumen $D_{i,j}^{(i')}$ podrá contarse como material disponible en el centro de distribución j para atender demandas con fechas de entrega $dd_{t'} \geq dd_t$. En particular, este volumen podrá destinarse a satisfacer los requerimientos de combustible p en la terminal j , siempre que el lote i transporte producto p (es decir, $y_{i,p} = 1$).

La variable $w_{i',t}$ es la encargada de determinar si la inyección de un nuevo lote $i' \in I^{new}$ se completa en el transcurso del período t , en cuyo caso $w_{i',t} = 1$. Como resultado, el último despacho de combustible desde la línea realizado durante la ejecución i' finalizará también en el período t . Luego, el valor de la variable $w_{i',t}$ deberá ajustarse a las condiciones impuestas por las Ecuaciones (IV.10) a (IV.12). La Restricción (IV.10) establece que toda inyección de un nuevo lote no ficticio ($\sum_p y_{i',p} = 1$) debe completarse en alguno de los períodos t que componen el horizonte. Luego,

$$\sum_{t \in T} w_{i',t} = \sum_{p \in P} y_{i',p} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (IV.10)$$

Como contrapartida, para toda ejecución ficticia se verifica $\sum_t w_{i',t} = 0$. Por otra parte, si la corrida $i' \in I^{new}$ se atribuye al período t ($w_{i',t} = 1$), debe asegurarse que $dd_{t-1} \leq C_{i'} \leq dd_t$, lo cual se impone a través de las siguientes restricciones:

$$C_{i'} \geq dd_{t-1} w_{i',t} \quad (IV.11)$$

$$C_{i'} \leq dd_t + (1 - w_{i',t})(h_{\max} - dd_t) \quad \forall i' \in I^{new}, t \in T \quad (IV.12)$$

En caso que $w_{i',t} = 0$, las Restricciones (IV.11) y (IV.12) se tornan redundantes: $0 \leq C_{i'} \leq h_{\max}$. Es importante notar que no existen limitaciones para el tiempo de inicio de las corridas. Dicho de otro modo, una ejecución $i' \in I^{new}$ que culmina en el período t puede haberse iniciado en el transcurso de algún período previo ($t' < t$), pues no existen restricciones que lo impidan.

La Figura IV.7 muestra un programa de ejecuciones sobre un horizonte de tiempo rodante que comprende seis días (144 horas). El mismo está dividido en cuatro períodos de duración desigual: $T1$ (dos días), $T2$ (un día), $T3$ (un día) y $T4$ (dos días). Por ende, existen cuatro “due-dates” dispuestas al

final de cada uno de los periodos: $dd_1 = 48$; $dd_2 = 72$; $dd_3 = 96$; $dd_4 = 144$, con todos los valores dados en horas. Por otra parte, el programa incluye cuatro corridas de bombeo: $B1$, desde la hora 0 hasta la hora 23; $B2$, desde la hora 35 hasta la hora 65; $B3$, desde la hora 70 hasta la hora 93; y $B4$, desde la hora 102 hasta la hora 125. Por definición, la primera de estas ejecuciones se completa en el primer periodo del horizonte ($T1$) y por consiguiente, $w_{B1,T1} = 1$, mientras que la segunda concluye en el segundo periodo ($w_{B2,T2} = 1$), a pesar de haber comenzado en el periodo previo. Por último, las corridas de inyección de los lotes $B3$ y $B4$ se completan en el transcurso de los periodos $T3$ y $T4$, respectivamente, de modo que $w_{B3,T3} = w_{B4,T4} = 1$.

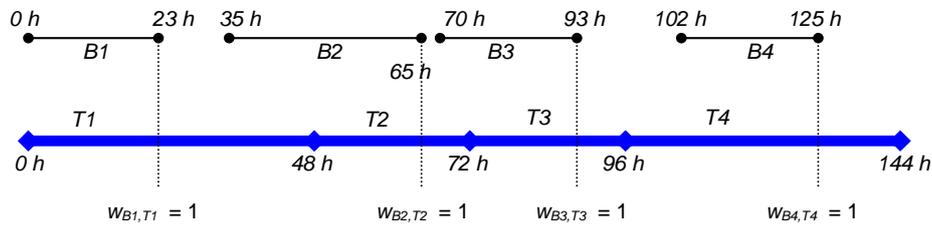


Figura IV.7. Programa de Bombeo Sencillo sobre un Horizonte Multi-periodo

IV.6.2 Seguimiento de los Envíos

Ubicación de los Lotes dentro del Poliducto al Tiempo $C_{i'}$. Sea $F_i^{(i')}$ la coordenada volumétrica superior del lote $i \in I$ en tránsito dentro del poliducto, al tiempo de culminación de la corrida de bombeo $i' \in I^{new}$. En otras palabras, $F_i^{(i')}$ mide el volumen contenido entre el origen del poliducto y la interfase del lote i con su antecesor ($i - 1$), al tiempo $C_{i'}$. Dado el orden cronológico del conjunto de envíos, la existencia y el desplazamiento de un nuevo lote dentro de la tubería tiene sentido sólo a partir de su propia inyección y de ejecuciones posteriores. Por lo tanto, variables como $F_i^{(i')}$, que controlan las propiedades de un lote i al tiempo de culminación de una nueva inyección i' , únicamente tendrán sentido para $i' \geq i$. Como el interior de la línea permanece completamente lleno de combustibles en todo momento, el valor de $F_i^{(i')}$ puede calcularse a partir de sumar a la coordenada del “batch” sucesor ($F_{i+1}^{(i')}$) el contenido del propio lote i ($W_i^{(i')}$), ambos al tiempo $C_{i'}$. Es conveniente señalar que el “batch” ($i + 1$) se transporta inmediatamente detrás del “batch” i , y el volumen interfacial entre ambos lotes se atribuye a la primera fracción del lote ($i + 1$).

$$F_{i+1}^{(i')} + W_i^{(i')} = F_i^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (IV.13)$$

Naturalmente, la coordenada inferior del lote $i \in I$ al tiempo C_i es $F_{i+1}^{(i)}$. Todas las propiedades dinámicas de los lotes dentro de la tubería (coordenadas de ubicación, contenido y volúmenes derivados a las terminales) se monitorean en cada evento de tiempo asociado a la finalización de una nueva corrida $i' \geq i$. Por definición, los cambios en el diámetro del tendido se contemplan en forma automática a través de las coordenadas volumétricas $F_i^{(i')}$ y $W_i^{(i')}$, que aparecen como variables del modelo, sin necesidad de recurrir a artilugios sofisticados, tales como los que se utilizan en modelos discretos.

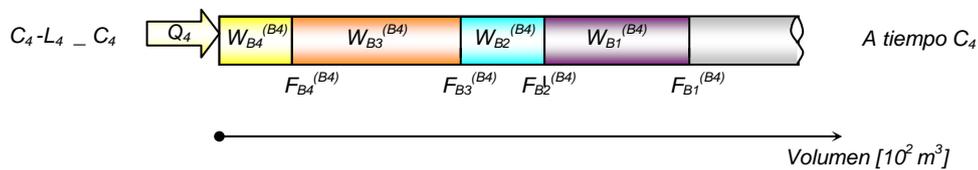


Figura IV.8. Posicionamiento de Lotes dentro del Poliducto

La Figura IV.8 describe la disposición de lotes en tránsito por el poliducto, luego de haber culminado la inyección del lote $B4$, al tiempo C_4 . De nuevo, como la tubería permanece llena de combustibles, la coordenada volumétrica inferior de todo lote i coincide con la coordenada superior del lote siguiente ($i + 1$). Luego, $F_{B1}^{(B4)} - W_{B1}^{(B4)} = F_{B2}^{(B4)}$, $F_{B2}^{(B4)} - W_{B2}^{(B4)} = F_{B3}^{(B4)}$, y así sucesivamente.

Disposición de un Nuevo Lote en la Tubería. Sea $W_i^{(i)}$ el volumen del nuevo lote $i \in I^{new}$ dentro del poliducto al finalizar su propia inyección (tiempo C_i). Si Q_i es el tamaño original del lote i , es decir, el volumen efectivamente impulsado, la diferencia $[Q_i - W_i^{(i)}]$ corresponde al total de material transferido desde el “batch” i a los destinos asignados, mientras el mismo lote está siendo inyectado. Obviamente, $Q_i \geq W_i^{(i)}$, y la coordenada inferior del lote i al tiempo C_i es igual a cero, pues constituye el último lote en el tren de envíos.

$$Q_i = W_i^{(i)} + \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i)} \quad ; \quad F_i^{(i)} - W_i^{(i)} = 0 \quad \forall i \in I^{new} \quad (IV.14)$$

La Figura IV.9 ilustra la corrida de inyección del “batch” $B4$. La misma transcurre desde la hora $C_4 - L_4$ hasta la hora C_4 , e introduce $Q_4 = 250$

unidades de producto $P3$ en el origen del poliducto. Parte del lote $B4$ se descarga en el primer depósito del trayecto ($D1$), mientras está siendo inyectado: $D_{B4,D1}^{(B4)} = 50$. Por consiguiente, el contenido del lote $B4$ al finalizar su inyección es $W_{B4}^{(B4)} = 200$ unidades. Es importante notar que la coordenada superior del lote coincide con su propio contenido ($F_{B4}^{(B4)} = W_{B4}^{(B4)}$) y que para realizar la entrega, el lote $B4$ debió alcanzar o superar la ubicación del depósito $D1$ a lo largo del trayecto ($F_{B4}^{(B4)} \geq \sigma_{D1}$). Dicho de otro modo, la transferencia de material desde el “batch” $B4$ al destino $D1$ durante la inyección del propio lote $B4$ es una operación factible.

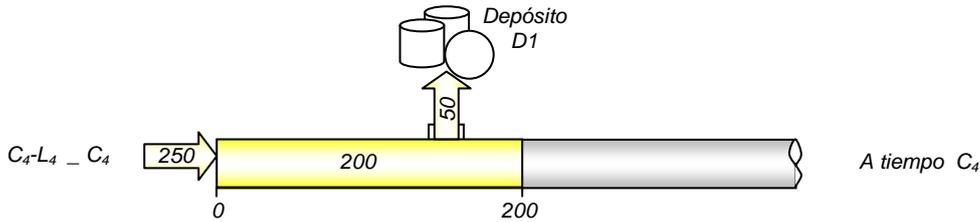


Figura IV.9. Inyección del Lote $B4$ y Entrega Simultánea al Depósito $D1$

Despacho de Material en Corridas Posteriores. Por definición, C_i es el tiempo al que finaliza la introducción del nuevo lote $i' \in I^{new}$. Supongamos que el lote $i \in I$ ($i < i'$) permanece dentro del poliducto antes de iniciar la inyección del lote i' . Luego, el volumen del lote i al tiempo C_i está dado por la diferencia entre el contenido del lote en una instancia previa (al tiempo C_{i-1}) y el volumen total entregado desde el lote i hacia las terminales del sistema, durante la ejecución i' .

$$W_i^{(i)} = W_i^{(i'-1)} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i)} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (IV.15)$$

En la operación de poliductos, la inyección de nuevos lotes persigue dos claros objetivos: (1) impulsar los envíos previos aguas abajo del trayecto, y (2) despachar combustibles en tránsito hacia las terminales de destino. La Figura IV.10 muestra la ubicación del lote $B4$ al tiempo C_4 , y las operaciones que se efectúan durante la inyección del nuevo lote $B5$ (desde la hora $C_5 - L_5$ hasta la hora C_5). El “batch” $B5$ contiene 100 unidades de producto $P1$. Antes de inyectar este último lote, el contenido de $B4$ era de $W_{B4}^{(B4)} = 200$ unidades de producto $P3$. Durante el bombeo de $B5$, 40 unidades de producto $P3$ provenientes del lote $B4$ se derivan al depósito $D1$. Como resultado, el

contenido de $B4$ al tiempo C_5 se ve reducido a: $W_{B4}^{(B5)} = W_{B4}^{(B4)} - D_{B4,D1}^{(B5)} = 200 - 40 = 160$. Las 60 unidades restantes de $B5$ han servido para impulsar aguas abajo al “batch” $B4$, desde $F_{B4}^{(B4)} = 200$ ($t = C_4$) hasta $F_{B4}^{(B5)} = 260$ ($t = C_5$).

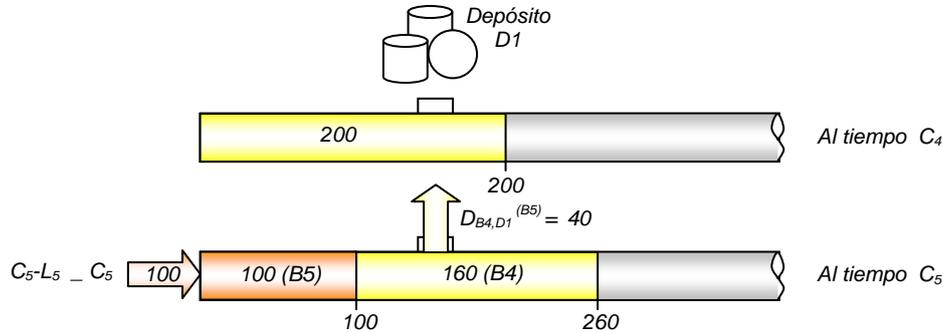


Figura IV.10. Movimiento de Lotes y Entrega de Material Durante la Inyección del “Batch” B5

Condiciones de Accesibilidad de “Batches” a Terminales. El despacho de material desde un lote $i \in I$ hacia la terminal $j \in J$ sólo es posible si el “batch” en tránsito alcanza la conexión física entre el poliducto y la estación receptora durante la ejecución de una corrida de bombeo $i' \in I^{new}$, $i' \geq i$. El cumplimiento de este requisito implica que:

- La coordenada superior del lote i al tiempo $C_{i'}$, descontado el volumen de la interfase ($\sum_p \sum_{p'} WIF_{i,p,p'}$), no debe ser menor que la coordenada de localización del depósito intermedio j (σ_j). En la última terminal $|J|$, que representa el extremo de la tubería donde se retiran todas las interfases, la condición se reduce a $F_i^{(i')} = \sigma_{|J|}$.
- La coordenada inferior del lote i al tiempo $C_{i'-1}$ debe ser menor que la coordenada del depósito σ_j , al menos por un volumen φ . El valor de φ representa la cantidad de producto transferida desde el lote i a las primeras j terminales del poliducto durante la corrida i' .

Sea $x_{i,j}^{(i')}$ la variable binaria que denota la accesibilidad del lote i al depósito j durante la ejecución i' , en cuyo caso $x_{i,j}^{(i')} = 1$. Por el contrario, si $x_{i,j}^{(i')}$ se anula, no existe transferencia de material desde el lote i al depósito j , al menos durante la corrida i' . Como resultado,

$$D_{\min} x_{i,j}^{(i')} \leq D_{i,j}^{(i')} \leq D_{\max} x_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j \in J \quad (IV.16)$$

En esta expresión, los parámetros D_{\min} y D_{\max} representan las cotas mínima y máxima para el volumen de material que puede entregarse desde un lote a

cada terminal, por ejecución. Normalmente, estos valores son provistos por los operadores de la línea sobre la base de criterios prácticos. Más aún, las Ecuaciones (IV.17) y (IV.18) resumen las condiciones de accesibilidad dadas en (a) y (b), respectivamente.

$$F_i^{(i')} - \sum_{p \in P} \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p}} WIF_{i,p,p'} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j < |J| \quad (IV.17)$$

$$F_i^{(i')} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, j = |J|$$

$$F_i^{(i'-1)} - W_i^{(i'-1)} + \sum_{j=1}^J D_{i,j}^{(i')} \leq \sigma_j + (\sigma_{|J|} - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(i')}) \quad (IV.18)$$

$$\forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j \in J$$

La Figura IV.11 retoma la corrida de bombeo asociada a la inserción del lote $B5$ en la tubería presentada en la Figura IV.10. Puede notarse que la coordenada superior del “batch” $B4$ al tiempo C_5 ($F_{B4}^{(B5)} = 260$), aún deduciendo el material de interfase, está por encima de la coordenada del depósito $D1$ ($\sigma_{D1} = 160$). Asimismo, la condición (b) de accesibilidad también se cumple, pues el lado izquierdo de la Ecuación (IV.18) suma 40 unidades, por debajo del valor $\sigma_{D1} = 160$ que impone el lado derecho. Por lo tanto, se dice que el lote $B4$ ha alcanzado la localización del depósito $D1$, y una cierta cantidad de combustible se transfiere desde $B4$ hacia $D1$ durante la corrida $B5$ ($x_{B4,D1}^{(B5)} = 1$). Por el contrario, el lote $B5$ al tiempo C_5 no ha arribado aún a la ubicación del destino $D1$ ($F_{B5}^{(B5)} = 100 < 260$). Luego, la Ecuación (IV.17) impone que $x_{B5,D1}^{(B5)} = 0$, y no existe la posibilidad de transferir material desde el lote $B5$ a los tanques de la estación $D1$ durante el intervalo de tiempo que comprende su propia inyección: $[C_5 - L_5, C_5]$.

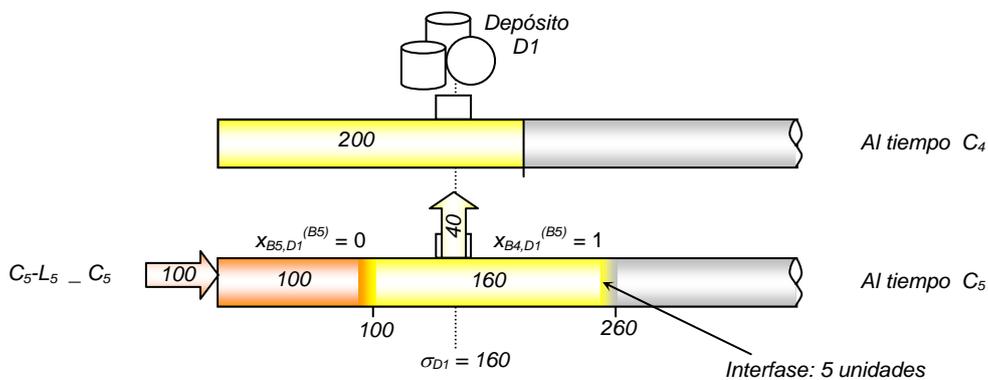


Figura IV.11. Condiciones de Accesibilidad de Lotes a Tanques de una Terminal

Por su parte, la Figura IV.12 ilustra múltiples entregas de combustible $P3$ desde el lote $B4$ a los destinos $D1$ y $D2$. Al tiempo C_5 (primera línea del diagrama) el “batch” $B4$ contiene 300 unidades de producto $P3$ y su ubicación ($F_{B4}^{(B5)} = 400$) ha superado la coordenada del depósito $D2$ ($\sigma_2 = 350$). Analicemos la cantidad de material que puede despacharse al depósito $D2$ durante la corrida $B6$. Teniendo en cuenta la dirección del flujo, la porción del “batch” $B4$ por encima de σ_2 (50 unidades) no podrá transferirse al destino $D2$ pues ya lo ha dejado atrás. Además, una fracción del mismo lote $B4$ se ha reservado para el depósito $D1$ (otras 50 unidades). En resumen, sólo $(300 - 50 - 50) = 200$ unidades de producto $P3$ podrán despacharse al destino $D2$ durante la inyección del nuevo lote $B6$.

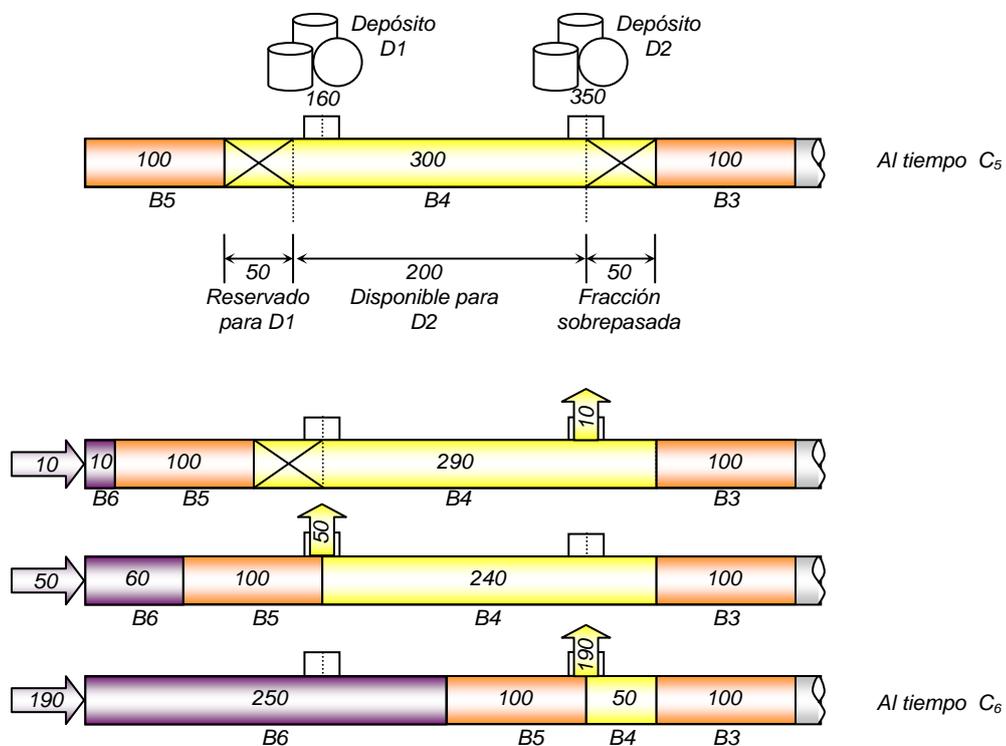


Figura IV.12. Operaciones Sucesivas de “Corte” del “Batch” $B4$

Las líneas siguientes de la misma Figura IV.12 describen la evolución del lote $B4$ en cuanto a tamaño y localización, durante el bombeo del “batch” $B6$. A través de $B6$ se introducen en la tubería 250 unidades de producto $P2$. En una primera etapa, se mantienen abiertas las válvulas de acceso a tanques de producto $P3$ en la terminal $D2$, de modo de abastecer a los mismos con 10 unidades provenientes del lote $B4$. Luego de transferirse las primeras 10

unidades, la porción de $B4$ reservada para el depósito $D1$ alcanza su destino y debe retirarse de inmediato. El abastecimiento de $P3$ a $D2$ se detiene y en forma simultánea se abren las válvulas de acceso a tanques del mismo producto en el destino $D1$. Como es de esperar, las estaciones de bombeo comprendidas en el tramo de poliducto que une $D1$ con $D2$ salen de funcionamiento. En esta operación, denominada “corte” de lotes, el depósito $D1$ recibe 50 unidades de $P3$ desde $B4$, al tiempo que se introducen 50 unidades adicionales de $P2$ en el origen del sistema. El “corte” del lote $B4$ debe comenzar en el mismo instante en que la fracción reservada llega a su destino. Por la condición de flujo unidireccional, todo volumen que sobrepase la coordenada del depósito $D1$ no podrá volver hacia atrás. Después de culminar el despacho, las válvulas de acceso a $D1$ se cierran, y se activa nuevamente el tramo $D1 - D2$, para entregar 190 unidades más de $P3$ en el destino $D2$. Esto último ocurre durante la inyección del volumen restante de producto $P2$ (lote $B6$) en la estación cabecera.

Límite de Material Disponible para Despacho. El volumen total transferido desde un lote $i \in I$ a los destinos $j \in J$ durante una nueva corrida de inyección $i' \in I^{new}$ ($i' \geq i$) no puede superar el contenido del propio lote i al momento de completarse la ejecución previa, esto es al tiempo C_{i-1} . Además, el material de interfase sólo puede retirarse en el último destino del trayecto, y no puede tenerse en cuenta para descargas en estaciones intermedias.

$$\sum_{j < |J|} D_{i,j}^{(i')} \leq W_i^{(i'-1)} - \sum_{\substack{p \in P \\ p' \in P \\ p' \neq p}} WIF_{i,p,p'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (IV.19)$$

$$\sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i')} \leq W_i^{(i'-1)} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i$$

Balance de Ingreso/Egreso de Combustibles. A partir de la condición de incompresibilidad de los combustibles líquidos transportados, el volumen total transferido desde los diferentes lotes en tránsito dentro de la tubería hacia los destinos $j \in J$, durante la inyección de un nuevo lote $i' \in I^{new}$ ($i' \geq i$), debe ser exactamente igual al volumen original del lote i' inyectado en el origen del sistema ($Q_{i'}$).

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i')} = Q_{i'} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (IV.20)$$

La Figura IV.13 expone el estado de los lotes en tránsito por el poliducto al tiempo C_4 (previo a la inyección del nuevo “batch” B_5) y al tiempo C_5 (al momento de completarse la introducción del lote B_5) en la primera y segunda línea del diagrama, respectivamente.

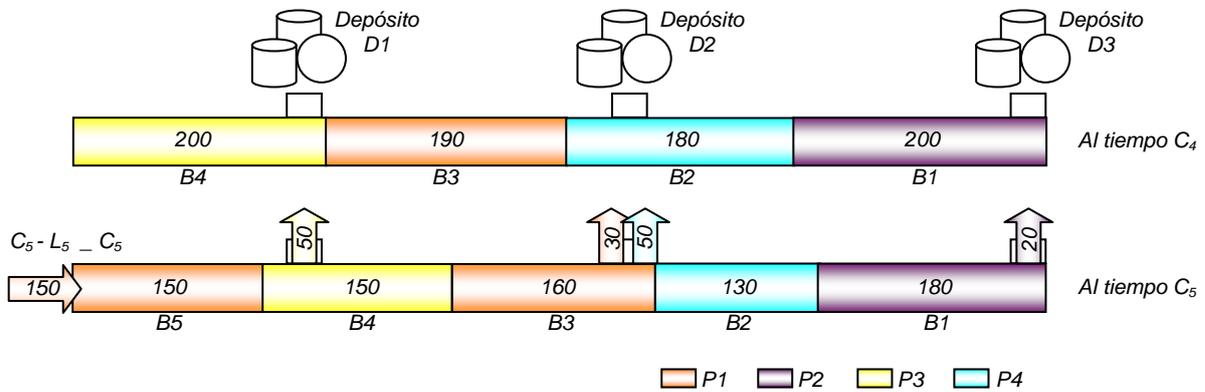


Figura IV.13. Balance Global de Ingreso/Egreso de Combustibles Durante la Inyección del Lote B_5

Tal como se ha remarcado, el poliducto permanece completamente lleno de combustibles en todo momento. Al tiempo C_4 , la tubería cuenta con 200 unidades de producto P_2 en el lote B_1 , 180 unidades de combustible P_4 en el “batch” B_2 , 190 unidades de P_1 en B_3 , y 200 unidades de P_3 en B_4 . El contenido total de la línea suma 770 unidades volumétricas. Con el nuevo lote B_5 se introducen 150 unidades de producto P_1 , motivando la transferencia de 150 unidades de diferentes combustibles hacia las terminales, para conservar así el volumen de combustibles contenido en el conducto. El destino D_1 recibe 50 unidades de combustible P_3 provenientes del lote B_4 , el depósito D_2 incorpora 50 unidades de P_4 desde el lote B_2 y 30 unidades de P_1 desde B_3 , mientras el lote B_1 abastece con 20 unidades de producto P_2 a la terminal D_3 . Estas operaciones de “corte” o “stripping” de “batches” sólo pueden efectuarse en la medida que se satisfacen las condiciones de accesibilidad expresadas a través de las Ecuaciones (IV.17) y (IV.18). No obstante, existen diversos modos de secuenciar los despachos de combustibles a terminales en el tiempo. El desarrollo de metodologías sistemáticas para la generación de programas detallados de despacho es una de las áreas de investigación actualmente en ejecución.

IV.6.3 Gestión de Inventarios de Combustibles en los Depósitos

Despacho de Combustibles hacia el Mercado. Definamos la variable $DM_{p,j}^{(i')}$ como el volumen de combustible $p \in P$ despachado desde los tanques del centro de distribución $j \in J_p$ al mercado durante la corrida i' . El valor de $DM_{p,j}^{(i')}$ representa el total de combustible p despachado por camiones cisterna, poliductos laterales, trenes, o vías alternativas, desde el destino j hacia clientes de la región de influencia, durante el intervalo $[C_{i'-1}; C_{i'}]$. La capacidad máxima de descarga de un combustible depende del producto y de los medios utilizados para la distribución. Por ejemplo, la velocidad de despacho de gases licuados, como el propano o el butano, suele ser inferior a la del resto de los combustibles líquidos. Si $vm_{p,j}$ mide la velocidad máxima de despacho de producto p desde la terminal j (en unidades por hora) luego:

$$DM_{p,j}^{(i')} \leq (C_{i'} - C_{i'-1}) vm_{p,j} \quad \forall p \in P, \forall j \in J_p, \forall i' \in I^{new} \quad (IV.21)$$

Cumplimiento de las Fechas de Entrega Pactadas. Supongamos que la inyección del lote $i' \in I^{new}$ se ha completado durante el período t (es decir, $w_{i',t} = 1$) y que la corrida sucesora finalizará en un período posterior, por lo que $w_{i'+1,t} = 0$. En consecuencia, la cantidad de combustible p transferida desde el depósito j al mercado de consumo durante las ejecuciones $\{i1, i2, \dots, i\}$ debe ser suficientemente grande como para atender las necesidades del mismo combustible pactadas para entrega antes de la culminación del período t (dd_t). Sin embargo, la última corrida i' finalizada en cada período t se desconoce de antemano. En consecuencia, debe incorporarse a la formulación matemática un bloque de restricciones condicionales, que imponen el cumplimiento de las órdenes de entrega comprometidas:

$$\sum_{\substack{\lambda=1 \\ \lambda \in I^{new}}}^{i'} DM_{p,j}^{(\lambda)} \geq \left(\sum_{k=1}^t dem_{p,j,k} (w_{i',t} - w_{i'+1,t}) \right) - B_{p,j,t} + B_{p,j,(t-1)} \quad (IV.22)$$

$$\forall p \in P, j \in J_p, t \in T, i' \in I^{new}$$

El lado izquierdo de la Ecuación (IV.22) representa el volumen total de producto p despachado al mercado desde el depósito j durante el intervalo de tiempo que va desde la hora 0 (inicio del horizonte actual) hasta la hora $C_{i'}$. En otras palabras, involucra todos los despachos realizados durante las corridas de inyección $\{i1, i2, \dots, i\} \in I^{new}$. Por su parte, en el lado derecho de la misma ecuación, el parámetro $dem_{p,j,k}$ denota la demanda total de combustible

p solicitada en la terminal j con “due-date” dd_k . Por ende, la sumatoria en el índice k resume el cúmulo de órdenes de producto p a atender por la terminal j durante el intervalo $[0 ; dd_t]$. No obstante, algunas solicitudes podrían satisfacerse fuera de término. Aquellos despachos de producto p que se liberan al mercado desde el depósito j con un período de retraso se consideran a través de la variable $B_{p,j,t}$. Estas órdenes atendidas con demora o “backorders” debieron entregarse antes del instante dd_t , pero por falta de combustible en tanques se abastecen recién durante el período $(t + 1)$.

Sólo si $i' \in I^{new}$ es la última corrida que se completa durante el período t , la diferencia $[w_{i',t} - w_{i'+1,t}]$ adopta un valor unitario activando así el término de demandas en el lado derecho de la Ecuación (IV.22). En cualquier otro caso, el término adopta un valor nulo o negativo, relajando la condición (ver Figura IV.14). Dicho de otro modo, si i' culmina en t pero $(i' + 1)$ no, la cantidad total de combustible p despachado por la terminal j desde $t = 0$ a $t = C_i$ debe satisfacer la demanda total de los períodos $k = t1, t2, \dots, t$, exceptuando las “backorders”. Para garantizar que la Restricción (IV.22) verifique el cumplimiento de todas las órdenes período a período, al menos una ejecución i' debe completarse en cada elemento t , aunque no necesariamente debe iniciarse en el mismo período. Con ese fin, se incorpora la siguiente condición:

$$\sum_{i \in I^{new}} w_{i,t} \geq 1 \quad \forall t \in T \quad (IV.23)$$

Si ninguna corrida de bombeo terminara en el período t , la Restricción (IV.23) obligaría a implementar la inyección en curso durante ese período a través de dos ejecuciones menores, con la primera finalizando en el período t .

La Figura IV.14 ilustra el significado de la Restricción (IV.22). El diagrama de tiempo involucra un horizonte multi-período dividido en días ($T1$, $T2$, y así sucesivamente). En las primeras 48 horas hay dos “due-dates” en las cuales se concentran las órdenes de despacho con fechas de entrega: $dd_1 = 24$ h y $dd_2 = 48$ h. Por otro lado, se han planeado cuatro corridas de bombeo cuyos tiempos de culminación (en horas) resultan: $C_1 = 10$, $C_2 = 24$, $C_3 = 44$ y $C_4 = 52$, respectivamente. Las primeras dos ejecuciones culminan dentro del período $T1$ ($w_{B1,T1} = 1$, $w_{B2,T1} = 1$), mientras la tercera lo hace en el segundo día $T2$ ($w_{B3,T2} = 1$, y obviamente $w_{B3,T1} = 0$). Por último, la finalización del cuarto elemento no corresponde al período $T2$, por lo cual $w_{B4,T2} = 0$. En consecuencia, el lote $B2$ es el último elemento cuya inyección se completa durante el primer día ($C_1 < C_2 \leq dd_1 < C_3$). Luego, el total de combustible

abastecido al mercado antes de la hora C_2 debe ser suficiente para atender en término los requerimientos pactados con “due-date” dd_1 . En forma análoga, el lote B_3 es el único elemento cuya impulsión se completa en el segundo período ($C_2 < C_3 \leq dd_2 < C_4$), y todos los despachos previos a la hora C_3 deberían cubrir las demandas de los dos primeros días (T_1 y T_2) para no incurrir en “backorders”. Ninguna de las corridas de bombeo está forzada a completarse en el instante de finalización de un período. No obstante, cuando el problema lo requiere, el modelo tiende a prolongar la extensión de las ejecuciones hacia el final de cada día, de modo de aprovechar al máximo la ventana de tiempo disponible para los despachos.

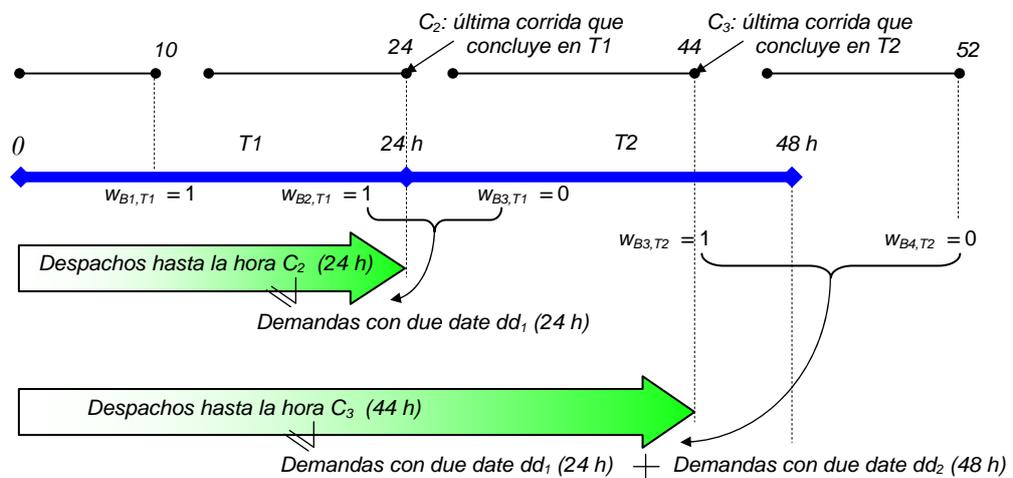


Figura IV.14. Ilustración de las Condiciones (IV.22)

Monitoreo del Stock de Combustibles en Depósitos. Dado que toda terminal del poliducto posee capacidad de almacenamiento limitada, la clave para una operación eficiente del sistema consiste en coordinar los flujos de ingreso desde la línea y de egreso hacia el mercado. Si ambos flujos no están adecuadamente balanceados en el tiempo, los tanques de los depósitos pueden verse colapsados, obligando a detener el transporte hasta que el problema se solucione. Los despachos de combustibles desde las terminales, cuyo volumen se encuentra acotado por las Restricciones (IV.21) y (IV.22), ya han sido estudiados. Sólo resta modelar las ecuaciones que permitan controlar los flujos provenientes de los lotes en tránsito por la tubería, y los niveles de inventario disponibles en tanques, en cada evento de tiempo $C_{i'}$, con $i' \in I^{new}$. El enfoque multi-período propuesto no sólo debe contemplar la atención de las demandas en el tiempo, sino además mantener los niveles de combustibles

almacenados en tanques dentro del rango permitido. De esta manera, podrán evitarse detenciones inesperadas del poliducto e incumplimientos en la entrega de material a los clientes:

- *Cantidad de Combustible p Transferido desde la Línea a Depósitos.* Por definición, el lote $i \in I$ transporta combustible p sólo en el caso que $y_{i,p} = 1$. Si $DP_{i,j,p}^{(i)}$ es la cantidad de producto p transferida desde el lote i al depósito $j \in J_p$ durante el intervalo $[C_{i'} - L_{i'}; C_{i'}]$, el valor de esa variable se corresponderá con el de su par $D_{i,j}^{(i)}$ siempre que $y_{i,p} = 1$ (es decir, el lote i efectivamente contenga producto p) y se tornará nulo cuando $y_{i,p} = 0$. Para los nuevos lotes introducidos en el horizonte actual ($i \in I^{new}$) cuyo producto asignado se desconoce de antemano, se pide que:

$$DP_{i,j,p}^{(i)} \leq D_{\max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new} \quad (IV.24)$$

$$\sum_{p \in P} DP_{i,j,p}^{(i)} = D_{i,j}^{(i)} \quad \forall i \in I, j \in J_p, i' \in I^{new} \quad (IV.25)$$

Por otra parte, para los lotes de combustible p disponibles dentro de la línea al inicio del horizonte ($i \in I^{old}$) se verifica:

$$DP_{i,j,p}^{(i)} = D_{i,j}^{(i)} \quad \forall i \in I^{old}, p \in P_i, j \in J_p, i' \in I^{new} \quad (IV.26)$$

- *Niveles de Stock Permitidos.* El volumen de producto p almacenado en tanques del destino $j \in J_p$ en el instante $C_{i'}$ puede calcularse a través de la Ecuación (IV.27). La disponibilidad de combustible al tiempo $C_{i'-1}$ se ve incrementada por el cúmulo de derivaciones del mismo producto que se producen durante la ejecución i' , provenientes de los lotes en tránsito por el poliducto ($\sum_i DP_{i,j,p}^{(i)}$). Al mismo tiempo, el stock se reduce en $DM_{p,j}^{(i')}$ unidades, a raíz del despacho de combustible p desde la terminal j hacia el mercado de la región de influencia. Como el valor de $ID_{p,j}^{(i')}$ debe permanecer siempre dentro del rango de valores permitidos, la Restricción (IV.28) tendrá que satisfacerse, aún cuando ello obligue a incumplimientos temporarios en la atención de las demandas (“backorders”).

$$ID_{p,j}^{(i')} = ID_{p,j}^{(i'-1)} + \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} DP_{i,j,p}^{(i)} - DM_{p,j}^{(i')} \quad \forall p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new} \quad (IV.27)$$

$$(ID_{\min})_{p,j} \leq ID_{p,j}^{(i')} \leq (ID_{\max})_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new} \quad (IV.28)$$

IV.6.4 Gestión del Programa de Producción en Refinería

Campañas de Refino de Combustibles. Sea $R_p \subset R$ el conjunto de campañas de producción de combustible p programadas en la refinería para el horizonte de planeación actual. Para coordinar los flujos de ingreso y egreso de productos en tanques de la estación cabecera, es necesario introducir dos nuevas variables binarias que permitan asegurar: (i) la disponibilidad de stock suficiente a la hora de inyectar un nuevo lote en la línea, esto es $IR_p \geq (IR_{\min})_p$; y (ii) el control de la capacidad máxima de almacenamiento de combustibles en tanques, es decir $IR_p \leq (IR_{\max})_p$. Una de las hipótesis del modelo establece que la velocidad de producción de combustibles en refinería es siempre menor que el caudal de inyección de lotes en el poliducto, algo que ocurre con normalidad en la práctica. Por consiguiente, las peores condiciones para verificar (i) $(IR_{\min})_p \leq IR_p$, y (ii) $IR_p \leq (IR_{\max})_p$ se presentan al momento de culminar o iniciar una nueva corrida de inyección de combustible en la línea, respectivamente. La mayor probabilidad de caer por debajo del nivel mínimo admisible se produce en el instante final de una nueva corrida de bombeo $i' \in I^{new}$ durante la cual se retira un volumen significativo de producto p para introducirlo en el poliducto. Dicho de otro modo, la inyección del nuevo lote i' con producto p podrá ejecutarse siempre que, una vez completada (instante $C_{i'}$), el nivel de stock de combustible se mantenga por encima del valor mínimo permitido ($(IR_{\min})_p$). Caso contrario, su inicio deberá demorarse hasta tanto la refinería provea un volumen adicional de producto p . Similarmente, la peor circunstancia en la que puede excederse el límite de capacidad en los tanques se manifiesta al iniciar una nueva corrida de inyección. Para evitar la sobrecarga de combustible p es suficiente con verificar que al tiempo de inicio de una nueva ejecución ($C_{i'} - L_{i'}$), el volumen almacenado respete el valor máximo de capacidad de los tanques asignados a cada especie.

Definición de las Variables Binarias $z_{l_{i,r}}$ y $z_{u_{i,r}}$. Para determinar el stock de combustible p en el instante de culminación C_i deben contemplarse todas las campañas de refino $r \in R_p$ que se hayan iniciado y/o completado antes de la hora C_i . Definamos la variable binaria $z_{l_{i,r}}$ para indicar que la inyección del lote $i \in I^{new}$ se completa antes ($z_{l_{i,r}} = 0$) o después ($z_{l_{i,r}} = 1$) del inicio de la campaña de refino $r \in R_p$ (hora α_r). De este modo, toda corrida de producción $r \in R_p$ que presenta $z_{l_{i,r}} = 0$ no contribuye con material al stock de combustible p al menos hasta la hora C_i , y debe ignorarse. Al mismo tiempo,

aquellas campañas con $z l_{i,r} = 1$ fueron iniciadas en un instante previo a C_i , debiendo determinarse el volumen total que han descargado en los tanques de la estación cabecera hasta ese momento. Por lo tanto,

$$a_r z l_{i,r} \leq C_i \leq a_r + h_{\max} z l_{i,r} \quad \forall i \in I^{new}, r \in R \quad (IV.29)$$

Conforme a lo expresado, el otro dato de interés corresponde al volumen de combustible p acumulado en tanques de la refinería al inicio de una corrida de inyección i al poliducto. Se introduce la variable binaria $z u_{i,r}$ para indicar que la impulsión del nuevo lote $i \in I^{new}$ comienza antes ($z u_{i,r} = 0$) o después ($z u_{i,r} = 1$) del cierre de la campaña de refino $r \in R_p$ (hora b_r). Toda campaña de producción r con $z u_{i,r} = 1$ habrá sido completada antes que comience la inyección i al tiempo $(C_i - L_i)$, y la totalidad del material de refino estará disponible en tanques de la estación de origen al iniciarse la corrida i . Sin embargo, aquellas campañas con $z u_{i,r} = 0$ sólo podrían haber sido ejecutadas en forma parcial, o incluso no haberse iniciado al instante $(C_i - L_i)$.

$$b_r z u_{i,r} \leq C_i - L_i \leq b_r + h_{\max} z u_{i,r} \quad \forall i \in I^{new}, r \in R \quad (IV.30)$$

La Figura IV.15 presenta un programa sencillo que involucra dos corridas de bombeo de los lotes $B1$ y $B2$ en el poliducto, y dos campañas de refino ($R1$ y $R2$) que abastecen de material a los tanques de la estación cabecera. El objetivo es ilustrar el significado de ambas variables binarias $z l_{i,r}$ y $z u_{i,r}$ utilizadas en la formulación. Puede notarse que:

- La inyección del lote $B1$ comienza a la hora $C_1 - L_1 = 15$, esto es 18 horas antes que la primera campaña $R1$ culmine ($b_{R1} = 33$). Por lo tanto, $z u_{B1,R1} = 0$. Esto implica que no deberá sumarse el total producido por $R1$ al stock disponible en tanques en el instante de inicio de $B1$.
- Por otro lado, la impulsión de $B1$ culmina a la hora $C_1 = 25$, es decir 6 horas después del inicio de $R1$ ($a_{R1} = 19$) resultando $z l_{B1,R1} = 1$. Así, al momento de culminar el bombeo (hora $C_1 = 25$) una fracción de la campaña $R1$ habrá sido descargada en los tanques de origen, facilitando no caer por debajo del stock mínimo admisible.
- Por el contrario, la impulsión del lote $B2$ empieza después de la finalización de $R1$ ($z u_{B2,R1} = 1$) y la totalidad del combustible generado deberá agregarse al stock de material en tanques al tiempo $(C_2 - L_2) = 35$. En ese instante, deberá procurarse respetar la capacidad máxima disponible.

La Restricción (IV.31) se cumple como igualdad estricta en los casos (i) y (ii). Para el primero se verifica $SL_{i,r} = q_r$, mientras que en el segundo caso, $SL_{i,r} = 0$. Por su parte, la Ecuación (IV.32) se torna activa en la tercera instancia, resultando $SL_{i,r} = vp_r (C_i - a_r)$. En caso que $z_{i,r} = 0$, la variable $SL_{i,r}$ adopta inexorablemente un valor nulo por la Ec. (IV.31), al tiempo que la Ec. (IV.32) se relaja ($SL_{i,r} \leq vp_r C_i$). Si en cambio $z_{i,r} = 1$, la cota máxima queda establecida por el mínimo entre $[q_r]$ y $[vp_r (C_i - a_r)]$, según se presente el caso (i) o (iii), en ese orden.

Cálculo del Volumen Producido en Refinería y Descargado en Tanques de la Estación Cabecera al Tiempo $C_i - L_i$. Sea $SU_{i,r}$ el volumen de combustible p obtenido en la campaña $r \in R_p$ y descargado en tanques de origen, al tiempo de inicio de una nueva inyección i en el poliducto, es decir a la hora $(C_i - L_i)$. Deben considerarse aquí dos situaciones posibles:

- (i) $C_i - L_i \geq b_r$: en este caso $z_{i,r} = 1$, y la campaña r se ha descargado íntegramente en los tanques asignados al tiempo $C_i - L_i$.
- (ii) $C_i - L_i < b_r$: luego $z_{i,r} = 0$, y una parte de la campaña r aún no se ha transferido a tanques al tiempo $C_i - L_i$.

Por lo tanto, el volumen de material de la campaña de producción r entregado por la refinería a tanques de la estación cabecera hasta la hora $C_i - L_i$ queda acotado por,

$$SU_{i,r} \geq q_r z_{i,r} \quad (IV.33)$$

$$SU_{i,r} \geq vp_r [(C_i - L_i) - a_r - h_{\max} z_{i,r}] \quad \forall i \in I^{new}, r \in R \quad (IV.34)$$

Según se ha expuesto, la peor condición para una posible sobrecarga de los tanques de combustible se produce al inicio de una nueva corrida de inyección. Por consiguiente, si fuera necesario, el modelo tiende a reducir el aporte de material desde la refinería ($SU_{i,r}$) al mínimo valor posible, evitando así alcanzar el tope de capacidad de los tanques. Por tanto, las Ecuaciones (IV.33) y (IV.34) sólo fijan cotas inferiores para el volumen transferido. Si $z_{i,r} = 1$, la campaña de producción r ha concluido antes del inicio de i , debiendo contarse la totalidad (q_r) como parte del stock almacenado. Esto se logra a través de la Ec. (IV.33), al tiempo que la Ec. (IV.34) se relaja. Por el contrario, cuando $z_{i,r} = 0$, la Ec. (IV.33) se torna redundante, y en el caso que se verifique $a_r < C_i - L_i < b_r$ (esto es, la campaña r se ha iniciado antes de la hora

$C_i - L_i$) la Restricción (IV.34) fuerza a la variable $SU_{i,r}$ a no caer por debajo de $vp_r [(C_i - L_i) - a_r]$. Por último, si $zu_{i,r} = 0$ y $C_i - L_i < a_r$, el lado derecho de la Ec. (IV.34) se torna negativo y la restricción se vuelve redundante.

Verificación de los Niveles Mínimo y Máximo de Stock en Tanques de la Estación Cabecera. Tal como se ha explicado, el nivel de inventario de producto p en tanques de la estación cabecera debe mantenerse por encima de un volumen mínimo $(IR_{\min})_p$ impuesto por el operador de la terminal. Normalmente, esta cota mínima es mayor que cero, y persigue dos objetivos: (a) preservar un *stock de seguridad* para absorber las variaciones típicas en el comportamiento de la demanda y en el plan de producción de las refinerías, y (b) evitar muy bajos niveles de productos en tanques ya que, por decantación, el combustible podría presentar un mayor nivel de impurezas. Dado que el caudal de inyección en el poliducto es mayor que la velocidad de producción en refinería, si ocurrieran faltantes de combustible en tanques de la estación cabecera, ellos aparecerían durante el transcurso de una corrida de bombeo y, por su puesto, al final de la misma. En consecuencia, el stock de combustible en tanques pasa por un mínimo al tiempo de finalización de una corrida de bombeo i (C_i). Si no ocurren faltantes al completarse la inyección de un nuevo lote (la “peor condición”) se puede asegurar que el nivel de stock de un producto nunca será menor que el nivel mínimo permitido. Por lo tanto, el volumen total de la especie p al tiempo de culminación de toda nueva corrida de bombeo $i \in I^{new}$, representado por la variable continua $IRF_p^{(i)}$, debe verificar:

$$IRF_p^{(i)} = IR_p^o + \sum_{r \in Rp} SL_{i,r} - \sum_{\substack{i' \in I^{new} \\ i' \leq i}} QP_{i',p} \geq (IR_{\min})_p \quad (IV.35)$$

$$\forall i \in I^{new}, p \in P$$

Del mismo modo, es indispensable que el volumen de combustible p no exceda la capacidad de los tanques que han sido asignados al almacenamiento de dicha especie $(IR_{\max})_p$. Dado que el nivel de stock de combustible en tanques de la estación cabecera pasa por un máximo (local) al inicio de una corrida de bombeo, la peor condición para la sobrecarga de los tanques ocurre al tiempo $C_i - L_i \forall i \in I^{new}$. Luego, esta condición debe verificarse al tiempo de inicio de toda nueva corrida $i \in I^{new}$, y el volumen total de producto p al tiempo $C_i - L_i$ ($IRS_p^{(i)}$) debe cumplir la siguiente restricción:

$$IRS_p^{(i)} = IR_p^o + \sum_{r \in R_p} SU_{i,r} - \sum_{\substack{i' \in I^{new} \\ i' < i}} QP_{i',p} \leq (IR_{max})_p \quad (IV.36)$$

$$\forall i \in I^{new}, p \in P$$

En el lado derecho de (IV.35) y (IV.36), el parámetro IR_p^o simboliza el nivel de inventario de combustible p al momento de comenzar las operaciones en el horizonte actual. La Restricción (IV.35) adiciona la producción acumulada de combustible p aportada por las diversas campañas de refino $r \in R_p$ a la estación cabecera, antes de la hora C_i . Asimismo, se deduce el total de combustible p inyectado al poliducto desde los mismos tanques, en todas las corridas previas, e incluso durante la propia corrida i . Por su parte, la estructura de la Ecuación (IV.36) es similar a la anterior, pero el punto de control del stock corresponde al inicio de toda nueva corrida ($C_i - L_i$). Se observa entonces que se descuenta el volumen descargado de los tanques e inyectado en el poliducto antes de la hora $C_i - L_i$, a través de las corridas de bombeo previas a la corrida i . Es decir, no se incluye el volumen impulsado durante la inyección i .

La variable $QP_{i',p}$ representa el volumen total de combustible p introducido en la línea con el nuevo “batch” i' . Esta variable adopta valor nulo cuando el lote i' no contiene a la especie p . Por el contrario, si p es efectivamente el combustible asignado al envío i' , $QP_{i',p}$ equivale al tamaño original del lote, es decir $Q_{i'}$. Su valor se obtiene de,

$$QP_{i',p} \leq Q_{max,p} y_{i',p} \quad \forall i' \in I^{new}, p \in P \quad (IV.37)$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i',p} = Q_{i'} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (IV.38)$$

donde $Q_{max,p}$ es el tamaño máximo permitido para envíos de combustible p .

IV.6.5 Condiciones de Partida

Los lotes que transitan por el poliducto al momento de iniciar las operaciones ($i \in I^{old}$) también se encuentran ordenados según la secuencia cronológica en que fueron inyectados. La coordenada superior de los lotes residentes en el poliducto a tiempo cero (F_i^o) aumentan al disminuir el índice i del lote. Como el lote $i - 1$ se ha impulsado inmediatamente antes que el lote i , su posición será más distante del origen de la tubería, y $F_{i-1}^o > F_i^o$. Por otra

parte, el contenido inicial de todo “batch” (W_i^o , $i \in I^{old}$) y el producto que le ha sido asignado (P_i , $i \in I^{old}$) son datos del problema, normalmente obtenidos del sistema de supervisión remota SCADA. En términos matemáticos,

$$F_i^{(i'-1)} = F_i^o \quad \forall i \in I^{old}, i' = first(I^{new}) \quad (IV.39)$$

$$W_i^{(i'-1)} = W_i^o \quad \forall i \in I^{old}, i' = first(I^{new}) \quad (IV.40)$$

IV.6.6 Función Objetivo

El objetivo del problema consiste en determinar el programa de bombeo y distribución que minimiza el costo operativo total del sistema de transporte por tuberías, que incluye (i) los costos de bombeo, tanto en horario normal como en periodos pico de demanda energética, (ii) el costo de degradación y/o reprocesamiento del material de interfase entre lotes sucesivos, (iii) los costos de “backorders” atribuidos a la atención tardía de la demanda en los centros de consumo, (iv) el costo imputado a la no-utilización de la capacidad de transporte disponible, y (v) los costos de mantenimiento de inventarios de combustibles en tanques de la estación cabecera y en los centros de recepción.

$$\begin{aligned} Min z = & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \left(cp_{p,j} \sum_{i \in I} \sum_{i' \in I^{new}} DP_{p,i,j}^{(i')} \right) + \psi PH \\ & + \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p}} \sum_{\substack{i \in I \\ i > 1}} cf_{p,p'} WIF_{i,p,p'} + \rho \left(hw_{max} + PH - \sum_{i \in I^{new}} L_i \right) \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} cb_{p,j,t} B_{p,j,t} + \frac{1}{|I^{new}|} \sum_{p \in P} \left[\sum_{j \in Jp} cid_{p,j} \sum_{i \in I^{new}} ID_{p,j}^{(i)} + cir_p \sum_{i \in I^{new}} IRS_p^{(i)} \right] \end{aligned} \quad (IV.41)$$

En esta última expresión, $cp_{p,j}$ representa el costo unitario de impulsión de combustible p desde el origen hasta el centro de recepción j en horario normal. Por su parte, el parámetro $cf_{p,p'}$ constituye una estimación del costo de reprocesamiento por unidad de producto-mezcla formado por las especies p y p' . La constante ψ simboliza el costo unitario de penalidad por operar el sistema de bombeo en periodos pico de demanda eléctrica. Dado el alto precio de la energía en horas pico, los poliductos suelen permanecer inactivos en esos intervalos, y el componente de penalidad adopta generalmente un valor nulo en el óptimo. En el término siguiente, el parámetro $cb_{p,j,t}$ es el costo atribuible a la atención tardía de una unidad de producto p , la cual debió despacharse a plaza desde el centro j antes de la hora dd_t , y fue postergada para dd_{t+1} . Seguidamente, el costo unitario ρ penaliza la sub-utilización de la

capacidad de transporte del poliducto, medida en términos de las horas de inactividad. El no-uso del sistema de transporte repercute directamente en los costos logísticos, no sólo por el lucro cesante que implica mantener semejante capital inmovilizado, sino también porque deberá recurrirse a la utilización de medios alternativos (como trenes o camiones) mucho menos convenientes.

Un párrafo aparte merece el último término de la función objetivo, destinado a la valorización del costo de mantenimiento de los inventarios de combustibles en el tiempo. El mismo se ha modelado sobre la base de una estimación de los niveles de stock promedio, a lo largo de todo el horizonte de planeación. Como valor representativo del volumen de p almacenado en el centro de recepción j durante el intervalo $[C_{i-1} ; C_i]$ se toma el stock disponible al tiempo C_i , esto es $ID_{p,j}^{(i)}$. Por lo tanto, el nivel promedio de combustible dentro de los tanques de las terminales a lo largo del horizonte puede aproximarse sumando todos los stocks disponibles al tiempo de culminación de cada una de las inyecciones potenciales $i' \in I^{new}$, y dividiendo el resultado por $|I^{new}|$. Cuando el plan de transporte óptimo no presenta corridas ficticias, la estimación obtenida como nivel de inventario promedio es relativamente buena. Luego, el costo de mantenimiento de un dado combustible p en tanques de recepción resulta de sumar el nivel de stock promedio en cada uno de los depósitos que almacenan y distribuyen a esta especie ($j \in J_p$) multiplicado por el costo de mantener una unidad de p en j durante todo el horizonte ($cid_{p,j}$). A su vez, el costo total de mantenimiento de inventarios en depósitos se determina agregando los costos atribuibles a cada uno de los productos. Un esquema computacional análogo se ha establecido para determinar el costo de mantenimiento de inventarios en tanques de la estación cabecera, próxima a la unidad de refino. Para ello, se ha recurrido al uso de los niveles de stock al inicio de las corridas de bombeo ($IRS_p^{(i)}$) dados por la Ecuación (IV.36).

IV.7 Actualización del Programa de Transporte por Tuberías

Existen dos motivos importantes que llevan a revisar periódicamente el programa de operaciones para el transporte de combustibles por poliductos:

1. La recepción de nuevas “nominaciones” u órdenes de transporte durante la ejecución del programa de despacho. Por lo general, estas nuevas solicitudes se programan para ser entregadas en las terminales

antes de la finalización del horizonte actual, debiendo inyectarse en la línea con la necesaria antelación.

2. El tiempo de entrega o “lead-time” considerable que presentan estos sistemas de transporte, especialmente para lotes destinados a las terminales más alejadas. Cuando se consideran horizontes estáticos, suelen planearse grandes “batches” de combustible hacia el final del programa, cuyo único objetivo es hacer llegar los envíos previos a cada uno de los centros de recepción asignados. En ese momento, todavía se desconoce la demanda de productos para períodos que están más allá del horizonte actual, y el material inyectado no tiene usualmente relación alguna con el perfil de requerimientos futuros ni destinos asignados. Por tal razón, es común hablar de productos “de relleno” o “filler products”. Sin embargo, en cada instancia de revisión del programa, el horizonte de tiempo “rueda”, y aquellos últimos lotes se reemplazan en forma gradual por una secuencia de envíos de tamaños más acotados, con destinos claramente establecidos.

El primer algoritmo propuesto para la revisión periódica del programa dinámico de operaciones en poliductos se describe en la Figura IV.16. Consiste en cinco etapas principales: (a) inicialización, (b) actualización de datos, (c) reprogramación, (d) ejecución de despachos y (e) rodado del horizonte.

IV.7.1 Etapa de Inicialización

Durante la fase de inicialización, el programador del poliducto fija los parámetros del módulo de planeación dinámica de las operaciones. Entre ellos,

- (A) El número de períodos (N) en que se divide el horizonte de tiempo rodante $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$, y la duración de cada uno de los períodos t : $h_t = (dd_t - dd_{t-1})$, expresada en horas. Para los ejemplos resueltos en la próxima sección, se ha adoptado $N = 4$ y $h = 168$ h (una semana) para todos los períodos que componen el horizonte. Las fechas de entrega pactadas de las órdenes se fijan para el final de cada una de las semanas. Como resultado, la extensión del horizonte resulta $h_{\max} = N * h = 672$ h, y las “due-dates” del plan inicial son: $\{dd_1 = 168, dd_2 = 336, dd_3 = 504, dd_4 = 672\}$.
- (B) El número de combustibles refinados a transportar a través del poliducto, desde la unidad de producción hacia los múltiples destinos, esto es $|P|$.

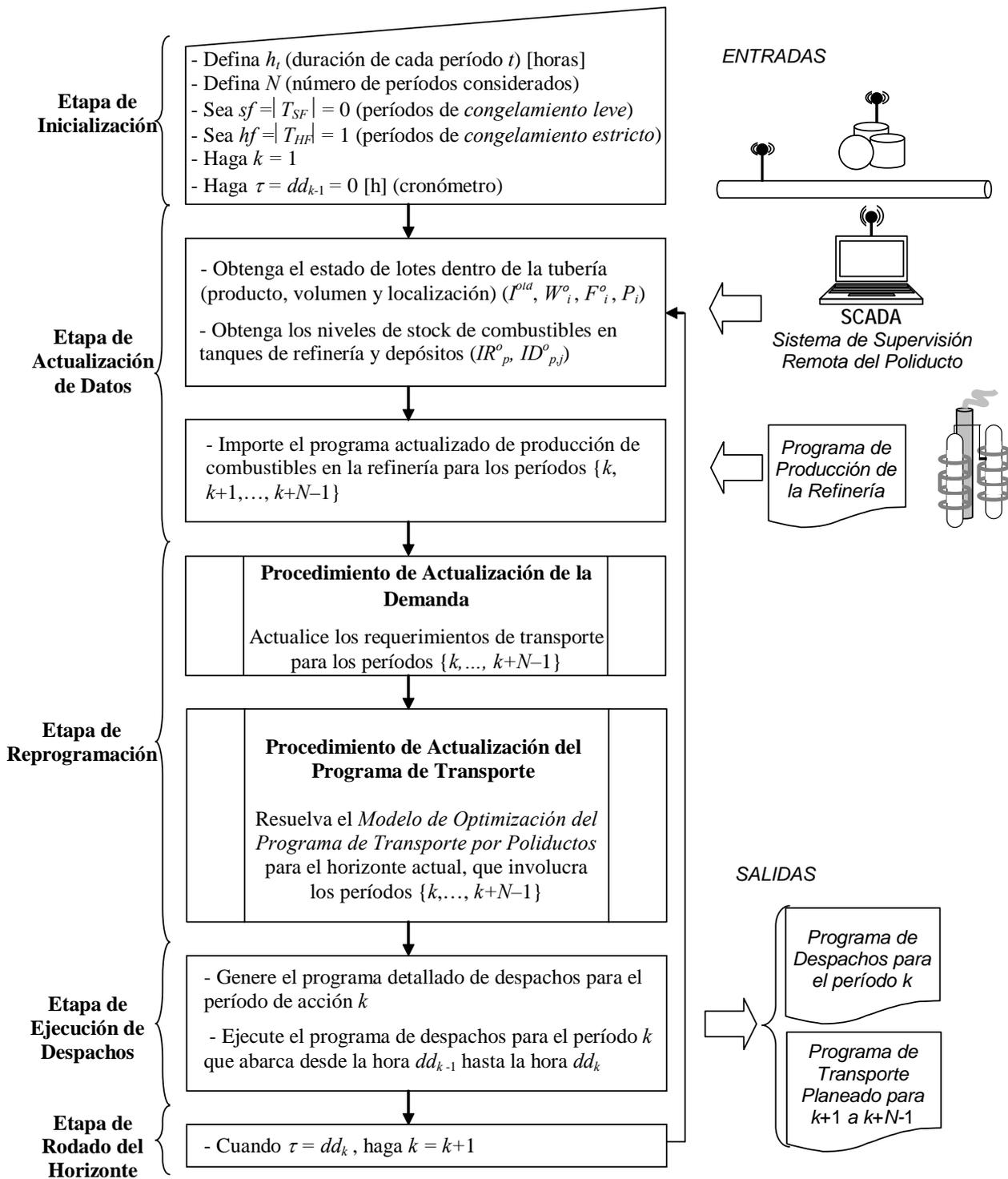


Figura IV.16. Algoritmo de Reprogramación de Operaciones en Poliductos

(C) El número de lotes consolidados $i \in I^{new}$ a impulsar en el nuevo horizonte, dado por la cardinalidad del conjunto I^{new} . Un valor aceptable para $|I^{new}|$ se estima en: $|I^{new}| = \lceil N * |P| / n \rceil$, donde $n = 2,0 - 3,5$. Si el valor escogido para $|I^{new}|$ fuese insuficiente, la región factible del problema podría no incluir a la solución óptima real. Siempre que el número de corridas

- efectivas (no-ficticias) del programa (NR) coincida con el valor de $|I^{new}|$, el conjunto de nuevos lotes deberá incrementarse en uno. Así, el programa se resuelve en forma secuencial hasta tanto no se consigan mejoras significativas, y se alcance el mínimo valor de la función objetivo.
- (D) El rango de valores permitidos para los niveles de stock de combustibles en tanques de refinería y depósitos (IR_{min}/IR_{max} , ID_{min}/ID_{max}), los caudales de transporte (vb_{min}/vb_{max}), y la capacidad de despacho de combustibles desde los depósitos al mercado (vm), en unidades de volumen por hora.
- (E) Los coeficientes de costo incluidos en la función objetivo del problema, así como la matriz de interfases entre productos disímiles impulsados en forma secuencial.
- (F) El intervalo de tiempo entre dos revisiones consecutivas del programa de bombeo (t_{RS}). Esta frecuencia de regeneración se expresa en periodos. Para los ejemplos resueltos en este capítulo, se asume que $t_{RS} = 1$, y la reprogramación del sistema se afronta al inicio de cada nueva semana.
- (G) El subconjunto de periodos de “congelamiento estricto” ($T_{HF} \subset T$) o valla de tiempo, que normalmente involucra a la primera semana del nuevo horizonte. En este periodo llamado “de acción”, las operaciones planeadas permanecen inalterables durante el proceso de revisión. En la práctica, la frecuencia de regeneración generalmente se iguala al número de periodos vallados, es decir que $t_{RS} = |T_{HF}|$. El algoritmo ilustrado en la Figura IV.16 supone que $t_{RS} = |T_{HF}| = 1$.
- (H) El subconjunto de periodos de “congelamiento leve” ($T_{SF} \subset T$), que puede incluir a uno o dos periodos posteriores al periodo vallado. Para estos intervalos, la secuencia de productos a inyectar permanece invariable, no así el volumen atribuido a cada envío. En los casos de estudio resueltos en la próxima sección, se ha adoptado $T_{SF} = \emptyset$.
- (I) El subconjunto de periodos no restringidos $T_{NF} = T - T_{HF} - T_{SF}$, para los cuales el programa de operaciones puede revisarse completamente.
- (J) El primer periodo del horizonte actual, denominado periodo k . El orden del periodo de acción k se utilizará además para identificar a cada instancia del horizonte móvil, a medida que el programa rueda en el tiempo. Para el horizonte inicial, $k = 1$.

IV.7.2 Etapa de Actualización de Datos

En el momento en que se activa el proceso de programación/reprogramación de operaciones, el primer paso consiste en actualizar la información de entrada para el nuevo horizonte k . El módulo de actualización de datos consta de las siguientes etapas:

- (A) Capture el estado actual del poliducto a través del sistema de supervisión remota (SCADA). Establezca la secuencia de envíos en tránsito (I^{old}), esto es, la identificación de cada lote (i), el producto contenido (P_i), su volumen (W^{o_i}) y ubicación (F^{o_i}). El sistema de adquisición y control supervisor de datos (SCADA) es un componente imprescindible en los sistemas de transporte por tuberías actuales.
- (B) Mediante el mismo sistema SCADA, registre la disponibilidad de cada combustible p en la granja de tanques de la estación cabecera (IR^{o_p}) como en los centros de distribución ubicados en cada nodo destino j ($ID^{o_{p,j}}$), al tiempo de inicio de la nueva instancia de reprogramación (dd_{k-1}).
- (C) Importe el programa de producción de la destilería y los caudales de refino de combustibles para los periodos $\{k, k+1, \dots, k+N-1\}$, que abarcan desde la hora dd_{k-1} hasta la hora $dd_{k-1} + h_{max}$. En la mayoría de los casos, la agenda de producción de la refinería se configura con antelación, basado en la disponibilidad de cada tipo de crudo, las demandas esperadas de los combustibles, y la capacidad de producción disponible.
- (D) Actualice el perfil de requerimientos en las terminales de distribución, incluyendo aquellas demandas que aún no han sido atendidas, y las órdenes de transporte que puedan haberse recibido y/o cancelado en el transcurso del período de acción del horizonte previo ($k - 1$). Para renovar los valores de demanda $dem_{p,j,t}$ deben tenerse en cuenta:

- (1) los despachos de combustible que se han concretado durante el período ($k - 1$) para atender en forma anticipada requerimientos pactados para el período $t > k - 1$ ($AD_{p,j,t}$); y
- (2) las demandas de combustible con “due-date” dd_{k-1} que no han sido atendidas durante el período ($k - 1$) y fueron postergadas como “backorders” para el período siguiente ($B_{p,j,k-1}$).

En consecuencia, los requerimientos actualizados de productos en cada terminal ($dem_{p,j,t}$) están dados por:

- Para el período $t = k$ (primer período del nuevo horizonte),

$$dem_{p,j,t} = (dem_{p,j,t})^{old} + NS_{p,j,t} - CS_{p,j,t} + B_{p,j,t-1} - AD_{p,j,t} \quad \forall p \in P, j \in J_p$$

- Para períodos $k+1 \leq t \leq k+N-2$,

$$dem_{p,j,t} = (dem_{p,j,t})^{old} + NS_{p,j,t} - CS_{p,j,t} - AD_{p,j,t} \quad \forall p \in P, j \in J_p$$

- Para el período $t = k+N-1$ (recientemente incorporado al horizonte),

$$dem_{p,j,t} = NS_{p,j,t} \quad \forall p \in P, j \in J_p$$

En estas expresiones, el parámetro $(dem_{p,j,t})^{old}$ representa el dato anterior de demanda para el período t utilizado por el programador en la instancia $(k - 1)$, mientras $NS_{p,j,t}/CS_{p,j,t}$ indican el tamaño total de las órdenes de transporte incorporadas/canceladas en el transcurso del período de acción más reciente. Por su parte, el volumen de demanda atendido con anticipación ($AD_{p,j,t}$) y el tamaño total de las órdenes postergadas ($B_{p,j,k-1}$) pueden computarse fácilmente a partir del programa de despacho ejecutado durante el período $(k - 1)$:

$$AD_{p,j,t} = \max \left[0, \sum_{\lambda=1}^{i_{k-1}} DM_{p,j}^{(\lambda)} - \sum_{n=k-1}^t (dem_{p,j,n})^{old} \right] \quad \forall p \in P, j \in J_p, t = k, \dots, k+N-1$$

$$B_{p,j,(k-1)} = \max \left[0, (dem_{p,j,(k-1)})^{old} - \sum_{\lambda=1}^{i_{k-1}} DM_{p,j}^{(\lambda)} \right] \quad \forall p \in P, j \in J_p$$

donde i_{k-1} es la última corrida de bombeo ejecutada durante el período de acción $(k - 1)$, y $DM_{p,j}^{(\ell)}$ representa el volumen de combustible p despachado al mercado desde los tanques de la terminal j , durante cada ejecución ℓ realizada en el período $(k - 1)$.

IV.7.3 Etapa de Reprogramación

Esta instancia constituye el paso central del algoritmo. Mediante la resolución del *Modelo de Optimización del Programa de Operaciones del Poliducto* presentado en la Sección IV.6, el objetivo es configurar el plan maestro de inyección de combustibles para la nueva instancia k del horizonte. La meta es optimizar el programa de bombeo y distribución de lotes a partir de la información actualizada. No obstante, sólo las operaciones planeadas para el primer período k serán implementadas, mientras que el resto de las tareas

constituyen proyecciones útiles a los efectos de mejorar la coordinación integral de la cadena de suministro.

IV.7.4 Etapa de Ejecución de Despachos

La fase siguiente busca generar el programa detallado de despachos para el período de acción k , a partir del plan maestro obtenido en la instancia previa. En particular, la etapa de ejecución de despachos deberá contemplar el conjunto de inyecciones y transferencias de material hacia los destinos programados para el intervalo $[dd_{k-1} ; dd_k]$. Respecto al plan maestro de operaciones, el programa de despacho provee de información más detallada sobre el cumplimiento de las órdenes de transporte que deben atenderse en cada período. Esta etapa normalmente se desarrolla sobre la base de procedimientos heurísticos y técnicas de simulación de eventos discretos, que permiten secuenciar y temporizar las operaciones de corte y entrega de lotes junto a las corridas de impulsión planeadas para el período k . El plan maestro de bombeo propuesto en la etapa previa garantiza la existencia de al menos una secuencia de entregas factible para cada ejecución. En general, suelen presentarse diversas alternativas, haciendo que el despachante adopte criterios complementarios para seleccionar la mejor opción. Por ejemplo, se busca evitar las detenciones de la línea, maximizar el rendimiento de las bombas, optimizar la configuración de las estaciones de bombeo, minimizar la tardanza, maximizar la puntualidad, entre otras. La implementación de procedimientos heurísticos y técnicas de simulación para el desarrollo del programa detallado de despachos en poliductos es uno de los últimos avances en el marco del plan de investigaciones. El análisis minucioso de esas herramientas no forma parte de esta tesis. Este trabajo se focaliza en el plan maestro de operaciones vinculadas al período de acción k .

Retomando el algoritmo de planeación dinámica, la última corrida de impulsión i_k cuyo inicio se atribuye al período k , esto es $dd_{k-1} < C_{i,k} - L_{i,k} < dd_k < C_{i,k+1} - L_{i,k+1}$, puede encontrarse en pleno desarrollo en el instante de revisión dd_k , siempre que se extienda sobre el próximo período ($dd_k < C_{ik}$). Si ese fuera el caso, los últimos despachos impulsados por i_k no serían completados antes de la finalización del período k , y se retomarian en la próxima instancia de planeación ($k + 1$). No obstante, según la propia estructura del modelo de optimización, todos los despachos asociados a i_k corresponderían a anticipos de demandas futuras (ver Ec. (IV.22)) por lo que, al ignorarlos en el horizonte

actual, no se introducen mayores distorsiones en los resultados. En los ejemplos abordados en la próxima sección, la secuencia de operaciones de corte hacia las diferentes terminales se configura buscando dar prioridad a los destinos más alejados. En otras palabras, se pretende favorecer a los centros de recepción más distantes para recibir los anticipos de combustible durante el mismo período de acción k .

IV.7.5 Rodado del Horizonte y Generación de una Nueva Instancia

Cada vez que se completa el intervalo t_{RS} asociado a la frecuencia de revisión del plan (tiempo $\tau = dd_{k-1} + h * t_{RS}$), el programa de operaciones del poliducto para los primeros t_{RS} períodos ha sido implementado, y el horizonte “rueda” t_{RS} períodos hacia delante. Si $t_{RS} = 1$, el nuevo período de acción será $k + 1$, generándose así una nueva instancia ($k + 1$) del horizonte temporal. Para actualizar el plan maestro del poliducto extendido sobre el nuevo horizonte, debe activarse nuevamente el proceso de revisión. De esta manera, se retoman en forma iterativa las instancias IV.7.2 a VI.7.4 del algoritmo dinámico descrito en este apartado.

IV.8 Implementación y Resultados

IV.8.1 Caso de Estudio: Poliducto São Paulo – Brasilia (Petrobrás, Brasil)

Para ilustrar las ventajas del enfoque dinámico propuesto en este capítulo, se ha de abordar una versión extendida del caso de estudio introducido por los investigadores Rejowski y Pinto en el año 2003. A partir del modelado continuo de los dominios de tiempo y longitud, es posible extender el horizonte de programación de 75 horas (Rejowski y Pinto, 2003) a 672 horas (28 días), y aún así encontrar soluciones óptimas en tiempos computacionales razonables. El sistema de transporte involucra la distribución de cuatro derivados del petróleo ($P1$ – Nafta, $P2$ – Diesel, $P3$ – Gas Licuado de Petróleo (LPG), y $P4$ – JP (Jet-fuel)) a través de una tubería simple de 955 km de longitud. El poliducto OSBRA, propiedad de Petrobrás Transporte S.A., constituye un recurso estratégico de Brasil, que une la mayor destilería del país en el estado de São Paulo (REPLAN) con la capital brasileña, Brasilia (ver Figura IV.17). En su largo trayecto, entrega combustibles a un total de cinco terminales de recepción: $D1$ – Riberão Preto, $D2$ – Uberaba, $D3$ – Uberlândia, $D4$ – Senador Canedo y $D5$ – Brasilia. Posee una estación impulsora inicial en

la terminal cabecera (Paulínia), y otras dos estaciones de re-bombeo, ilustradas en la Figura IV.17 con cuadros azules.



Figura IV.17. Poliducto OSBRA (São Paulo – Brasília) de Petrobrás

El algoritmo dinámico deberá determinar el plan de operaciones del poliducto sobre un horizonte rodante multi-período compuesto por cuatro semanas. Los requerimientos semanales de cada uno de los combustibles en los destinos $D1$ a $D5$ se presentan en la Tabla IV.1. Al iniciar el mes, el programador dispone de los datos de demanda para los periodos $t1$ a $t4$, debiendo prever el despacho de tales volúmenes hacia los mercados de la región de influencia, antes de la finalización de cada período.

Tabla IV.1. Demanda de Combustibles para los Períodos $t1$ a $t4$ en las Terminales del Poliducto ($dem_{p,j,t}$)

	Requerimientos de Productos [10^2m^3]																			
	D1				D2				D3				D4				D5			
	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4
P1	40	30	50	50	100	100	150	120	90	120	100	110	140	180	170	150	100	120	90	100
P2	100	120	100	120	100	100	100	110	70	80	70	60	200	200	200	220	220	210	250	220
P3	30	40	30	20	0	0	0	0	20	30	20	30	50	60	50	40	30	20	20	40
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	80	60	70	70	80	60	90

En la primera instancia de resolución (horizonte $\{t1 - t4\}$), aún se desconocen los requerimientos de transporte para los períodos posteriores $t5$ a $t7$. No obstante, estos datos se irán incorporando gradualmente a medida que el horizonte multi-período rueda en el tiempo. Si las operaciones planeadas se revisan semanalmente, el primer proceso de actualización se activa al inicio del nuevo horizonte $\{t2 - t5\}$, esto es, al tiempo $t = 168$ h. En ese momento, la reprogramación del transporte persigue dos objetivos: (1) regenerar el plan de operaciones para los períodos $\{t2 - t4\}$, que siguen formando parte del horizonte, y (2) proyectar las acciones correspondientes al nuevo período incorporado ($t5$). Como el entorno de condiciones que rigen el funcionamiento del sistema es de naturaleza dinámica, podrían presentarse modificaciones en el perfil de demanda de los combustibles durante la ejecución del primer período $t1$. Tales cambios se asocian al arribo y/o cancelación de órdenes de transporte para los períodos $\{t2 - t4\}$, y a la incorporación de las nuevas solicitudes para el período $t5$, recientemente anexado al final del nuevo horizonte. En el caso de estudio propuesto, se introducirán algunos ajustes al iniciar la fase $\{t2 - t5\}$. Los mismos resultan de la reducción de un par de envíos destinados a los depósitos $D1$ y $D5$, que se habían planeado para entrega en la semana $t3$. Una de estas solicitudes directamente se cancela.

La Tabla IV.2 muestra el perfil de demanda de combustibles en cada uno de los centros de recepción, proyectado para los períodos $t5 - t7$. Estos datos se irán incorporando gradualmente en la planeación de operaciones a medida que el horizonte se desplace, y el programa de despachos para los períodos de acción $\{t1, t2, t3\}$ vaya siendo ejecutado.

Tabla IV.2. Demandas de Combustibles Proyectadas para los Períodos $t5 - t7$

	Requerimientos de Productos [10^2m^3]														
	D1			D2			D3			D4			D5		
	t5	t6	t7	t5	t6	t7	t5	t6	t7	t5	t6	t7	t5	t6	t7
P1	40	50	60	100	120	120	90	100	90	140	120	120	100	100	100
P2	100	120	100	100	100	110	70	60	70	200	200	220	220	200	200
P3	30	30	30	0	0	0	30	30	30	50	40	50	30	40	30
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	70	70	60	70	70

La información restante vinculada al caso de estudio se presenta en las Tablas IV.3, IV.4 y IV.5. La Tabla IV.3 describe el volumen de la tubería

contenido entre el origen y cada uno de los destinos. Estos valores dependen de la distancia que separa los centros logísticos y el diámetro del conducto en cada uno de los tramos. Asimismo, se reportan las existencias iniciales de combustibles, y los volúmenes mínimos y máximos admisibles de stock en tanques de la estación cabecera y en los centros de recepción. El costo unitario de impulsión asociado al transporte de una unidad de producto desde la refinería a cada depósito también se detalla en la Tabla IV.3. Por su parte, la Tabla IV.4 provee los tamaños y los costos atribuibles al reproceso del material de interfase, así como los tiempos de transición o “changeover” entre corridas de inyección de lotes consecutivos con productos distintos. Las secuencias prohibidas por incompatibilidad entre las especies aparecen con una “X”. Se introducen además los costos unitarios de mantenimiento de inventarios de combustible en tanques de origen y destinos. De la Tabla IV.4 se desprende que los costos imputables al material inmovilizado en tanques de refinería y centros de recepción (sobre todo en estos últimos) constituyen una parte significativa de los costos operativos totales del sistema de transporte por poliductos. Como resultado directo, el stock de combustible transferido desde la tubería a los tanques de recepción se descarga rápidamente para atender a los mercados de consumo locales, a través de despachos tempranos que pueden incluso adelantarse una o dos semanas respecto de la fecha de entrega comprometida.

Tabla IV.3. Ubicación de los Destinos, Niveles de Stock y Costos de Bombeo

Prod.	Nivel	Refinería	Depósitos [10^2m^3]					Prod.		Depósitos				
		[10^2m^3]	D1	D2	D3	D4	D5			D1	D2	D3	D4	D5
P1	Min	400	50	30	20	50	50	P1	Costo de Bombeo [$$/m^3$]	3,5	4,5	5,5	6,0	6,9
	Max	2300	190	90	90	190	180							
	Inicial	1000	120	40	50	110	100							
P2	Min	400	90	50	90	150	150	P2	Costo de Bombeo [$$/m^3$]	3,6	4,6	5,6	6,2	7,3
	Max	2300	270	190	270	720	720							
	Inicial	1200	230	150	180	350	330							
P3	Min	50	20	0	20	20	20	P3	Costo de Bombeo [$$/m^3$]	4,8	5,7	6,8	7,9	8,9
	Max	600	120	0	120	180	92							
	Inicial	100	90	0	90	60	60							
P4	Min	150	0	0	0	30	25	P4	Costo de Bombeo [$$/m^3$]	3,7	4,7	5,7	6,1	7,0
	Max	1500	0	0	0	140	136							
	Inicial	315	0	0	0	90	110							
Volumen desde Refinería [10^2m^3]			400	650	900	1500	1635							

Tabla IV.4. Datos de Transición entre Lotes y Costos de Mantenimiento de Stock

	Costo de Interfase [10^2 \$] / Volumen [10^2 m ³] / Tiempo de "Changeover" [h]				Costos de Inventario [\$ / m ³ h]					
	P1	P2	P3	P4	Ref.	D1	D2	D3	D4	D5
P1		30/ 0,30/ 2,5	37/ 0,37/ 2,0	35/ 0,35/ 1,0	0,020	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
P2	30/ 0,30/ 4,0		X	38/ 0,38/ 5,0	0,023	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155
P3	37/ 0,37/ 1,5	X		X	0,070	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
P4	35/ 0,35/ 1,0	38/ 0,38/ 3,0	X		0,025	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170

Tabla IV.5. Campañas de Producción de Combustibles Planeadas por la Refinería para el Ejemplo IV.1

Campaña de Producción	Producto	Volumen [10^2 m ³]	Caudal de Refino [10^2 m ³ /h]	Intervalo de Tiempo [h]
R1	P2	2520	5	0 – 504
R2	P4	600	5	0 – 120
R3	P1	2520	5	168 – 672
R4	P3	500	5	336 – 436
R5	P4	1180	5	436 – 672
R6	P4	160	5	672 – 704
R7	P1	160	5	672 – 704
R8	P2	1000	5	704 – 904
R9	P3	500	5	804 – 904

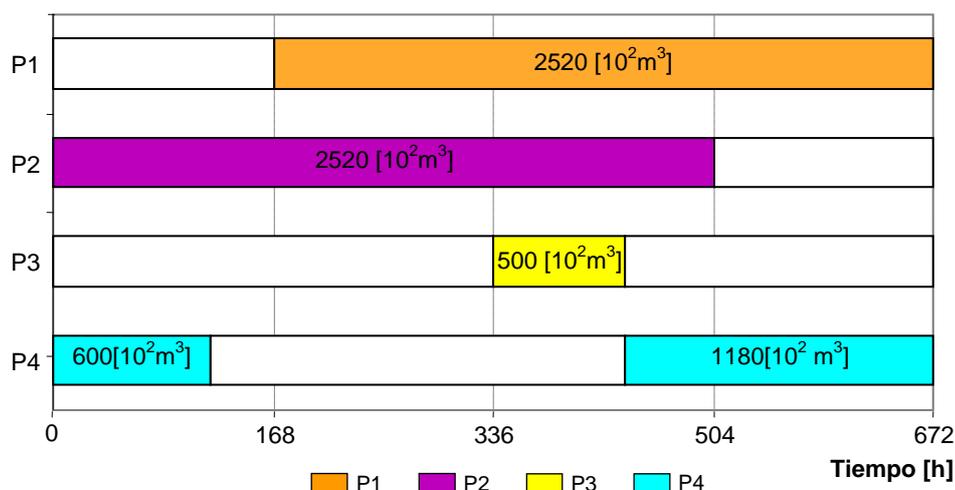


Figura IV.18. Programa de Refino para el Horizonte $\{t_1-t_4\}$

Tanto la Tabla IV.5 como la Figura IV.18 describen las campañas de producción planeadas por la refinería, que se ejecutarán sobre el horizonte mensual $\{t1 - t4\}$. La Tabla IV.5 incluye además las campañas de refino proyectadas para los periodos subsiguientes $t5 - t7$.

El estado inicial del poliducto, al momento de planear las operaciones para el horizonte $\{t1 - t4\}$, se ilustra en la primera línea de la Figura IV.20. Al tiempo $t = 0$, el interior de la tubería dispone de un total de cinco lotes $\{B5_{P2}, B4_{P1}, B3_{P3}, B2_{P1}, B1_{P2}\}$, cada uno de los cuales contiene el tipo de combustible especificado como subíndice. Los volúmenes transportados son 400, 700, 200, 200, y 135 [10^2m^3], respectivamente. En este caso, el costo unitario de bombeo se supone invariable en el tiempo, ya que no se consideran periodos específicos de alto costo energético. Asimismo, el caudal de transporte debe mantenerse dentro del rango permitido, de 8 a 12 [$10^2\text{m}^3/\text{h}$].

En lo sucesivo, se analizarán dos instancias distintas del mismo caso de estudio. En el Ejemplo IV.1, el programa de producción de la refinería permanece inalterable con el correr del tiempo. Por el contrario, en el segundo ejemplo las campañas de refino a ejecutar en los periodos $\{t2 - t4\}$ se modifican ligeramente al iniciar la nueva instancia $\{t2 - t5\}$ del horizonte móvil, a raíz de ciertos cambios en la disponibilidad de crudos (Ejemplo IV.2). Como el procedimiento de reprogramación se desarrolla en forma iterativa al inicio de cada semana, el objetivo del Ejemplo IV.2 es demostrar la capacidad del algoritmo propuesto para reaccionar apropiadamente ante el dinamismo del entorno.

IV.8.2 Ejemplo IV.1: Programa de Refino Invariable

En el primer ejemplo de aplicación, el programa de producción de la refinería proyectado sobre el horizonte $\{t1 - t4\}$ se mantiene constante en cada instancia de revisión del plan. Sin lugar a dudas, las campañas de refino de combustibles constituyen una información clave para el problema de planeación dinámica. La robustez de la mejor estrategia de operaciones del poliducto depende fuertemente de la disponibilidad de combustibles en la refinería. En ciertos casos, se observan planes de producción basados exclusivamente en el volumen de crudos disponibles en la unidad de refino para la obtención de derivados, ignorando la cantidad y el momento en que

estos productos deberían abastecerse a las terminales del sistema logístico. En tales circunstancias, es dificultoso hallar siquiera una solución factible.

Programación de Operaciones del Poliducto: Primera Fase

Al tiempo $t = 0$, el primer paso del proceso de planeación consiste en obtener la propuesta inicial de distribución de combustibles para el horizonte $\{t1 - t4\}$, que daremos en llamar programa “estático”. La cardinalidad del conjunto de ejecuciones (I^{new}) se supone inicialmente igual a: $(|P| * |T| / 3) = (4*4) / 3 \approx 5$. A partir de este valor de $|I^{new}|$, la resolución del programa matemático descrito en este capítulo permite configurar el plan de operaciones para el horizonte estático $\{t1 - t4\}$, el cual se ilustra en la Figura IV.20. El carácter estático del plan refiere a la necesidad de revisar en forma iterativa las decisiones adoptadas, para configurar finalmente un plan de operaciones dinámico, generado a medida que el horizonte rueda en el tiempo.

El programa de distribución de combustibles propuesto involucra una secuencia de inyección de cinco nuevos lotes $\{B6, B7, B8, B9, B10\}$, cuyo volumen (en cientos de m^3) y combustible asignado (dado como subíndice) se detallan a continuación: $425,00_{P4}$, $1720,00_{P2}$, $1282,50_{P1}$, $430,37_{P3}$, $1180,00_{P1}$. Por su parte, la Figura IV.20 presenta una información detallada sobre el plan de inyección de combustibles y las entregas de material a cada una de las terminales, programadas hasta la hora 198,33 (final de la segunda ejecución). Para el resto del horizonte (fuera del período de acción $t1$), sólo se describe la evolución de los lotes dentro de la tubería, pues forman parte de las operaciones proyectadas, que se revisarán al finalizar cada semana. En efecto, el lote $B6$ se conforma de 425 unidades de producto $P4$, que se introducen en la tubería desde la hora 5 hasta la hora 52. Durante esta primera ejecución se producen derivaciones desde los lotes en tránsito $\{B4, B3, B2, B1\}$ hacia las terminales $\{D2, D3, D4, D5\}$. Las operaciones de corte o “stripping” de “batches” incluyen:

- (i) 135 unidades de producto $P2$, provenientes del “batch” $B1$, hacia el destino $D5$. Como la transferencia del lote es completa, se verifica que $W_{B1}^{(B5)} = D_{B1,D5}^{(B6)} = 135$.
- (ii) Una fracción importante de las 200 unidades de $P1$ disponibles en el lote $B2$, hacia las terminales $D4$ y $D5$ (80 y 50 unidades en ese orden).
- (iii) 10 unidades de $P3$ contenidas en el lote $B3$, hacia el destino $D4$.

- (iv) Dos fracciones de 90 y 60 unidades de combustible P1 (lote B4), hacia los centros D2 y D3, respectivamente.

Del mismo modo, el tren de lotes que transitan por el poliducto avanza en su recorrido. En particular, la coordenada volumétrica superior del lote B4 se incrementa desde $F_{B4(B5)} = 1100$ a $F_{B4(B6)} = 1375$ unidades durante la inyección del “batch” B6.

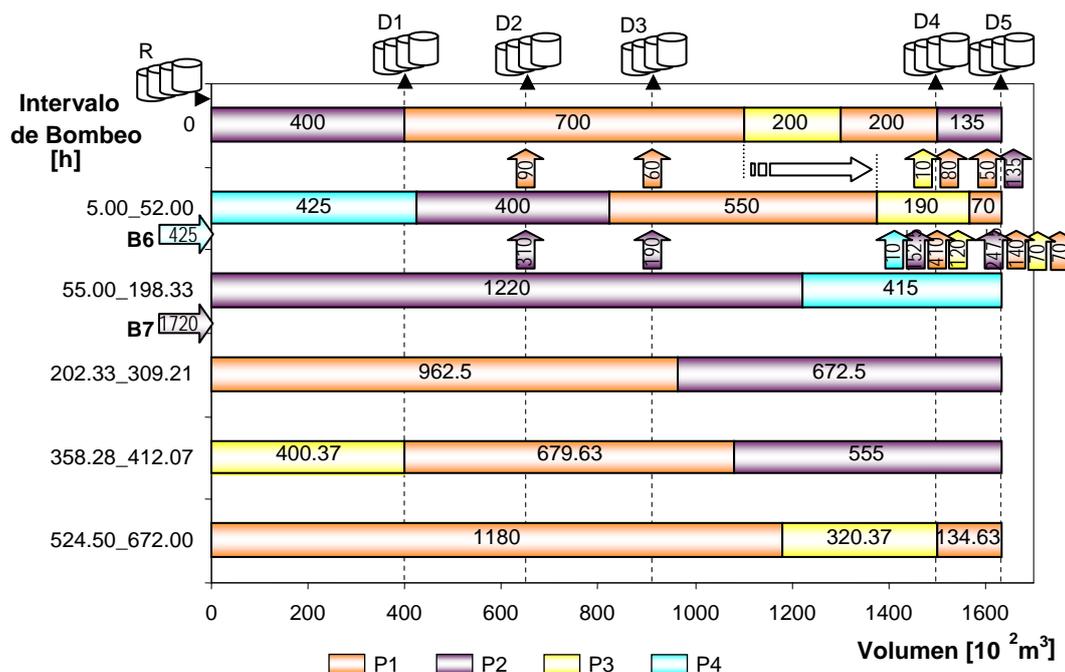


Figura IV.20. Programa de Operaciones para el Horizonte Estático Inicial {t1-t4}

Tabla IV.6. Tamaños de los Modelos y Requerimientos Computacionales para cada Instancia de Resolución del Ejemplo IV.1

Horizonte	# <i>old</i>	# <i>new</i>	# <i>I</i>	Variables Binarias	Variables Continuas	Ecuaciones	Tiempo CPU [s]	Solución Óptima [10 ² \$/mes]
t1 – t4	5	5	10	240	2223	3380	15.63	175951.68
t2 – t5	2	6	8	213	1958	3228	124.41	164681.95
t3 – t6	4	6	10	273	2660	3882	216.33	181538.22
t4 – t7	7	6	13	363	3418	4757	330.30	189873.39

El modelo de programación matemática MILP fue implementado y resuelto en un procesador Pentium IV 2 GHz mediante el algoritmo CPLEX, disponible en ILOG OPL Studio versión 3.7 (Ilog, 2004). Como criterio de detención se adoptó un “gap” o error relativo máximo de 1×10^{-4} , y una tolerancia de integralidad igual a 1×10^{-5} . Luego de resolver la formulación

MILP inicial, la cardinalidad del conjunto I^{new} se incrementa en uno, y el modelo se resuelve nuevamente. El procedimiento se repite hasta que no se alcanzan reducciones en los costos operativos del sistema. La solución óptima para el horizonte inicial se encuentra en la primera iteración, donde $|I^{new}| = 5$. El tamaño del modelo MILP para el primer horizonte $\{t1 - t4\}$ y el tiempo computacional de resolución asociado se resumen en la primera línea de la Tabla IV.6.

La inyección del lote $B6$ programada para el primer período de acción $t1$ se implementa por completo tal como fuera estipulado. Sin embargo, la segunda ejecución (“batch” $B7$) se interrumpe al finalizar la primera semana ($t = 168$ h). En consecuencia, su duración se reduce a $(168 - 55) = 113$ h. Como el caudal de inyección de cada lote se asume constante durante toda la corrida, el tamaño inicial del “batch” $B7$, esto es Q_{B7} , impulsado durante la primera semana resulta: $(113,00 / 143,33) * 1720 = 1356$ unidades, en lugar de las 1720 unidades planeadas originalmente. A pesar de ello, todos los despachos previstos para las terminales más distantes ($D4$ y $D5$), provenientes de los lotes $B2$, $B3$, $B4$, $B5$, y $B6$ pueden desarrollarse con normalidad. Sólo las derivaciones proyectadas desde el propio lote $B7$ hacia las terminales $D2$ y $D3$ se ven interrumpidas. Una de ellas, destinada al depósito $D3$, se reduce de 190 a 136 unidades, y la operación restante (310 unidades de $P2$ hacia $D2$) directamente se pospone para la semana $t2$. El programa de transporte que cubre el resto del horizonte sólo involucra inyecciones planeadas que podrían modificarse a medida que el algoritmo evoluciona en el tiempo. La agenda dinámica de operaciones que finalmente se ejecuta sobre los períodos $\{t1 - t4\}$ se analizará en detalle en las próximas secciones.

Actualización del Programa para el Próximo Horizonte $\{t2 - t5\}$

Según la propia estructura del algoritmo, el programa de operaciones del poliducto debe actualizarse al inicio de la semana $t2$, momento en el que se incorporan las solicitudes de transporte aceptadas para el nuevo período $t5$. Supongamos que el despachante ha ejecutado sin inconvenientes la secuencia de inyección y derivación de lotes prevista para el período de acción $t1$, de acuerdo al programa antes descrito. Sólo dos lotes $B6_{P4}$ y $B7_{P2}$, con 425 y 1356 unidades de combustible respectivamente, se introducen en la tubería durante la primera semana. A la hora $\tau = 168$, se genera la instancia $k = 2$ del horizonte rodante, y el proceso de reprogramación se activa buscando hallar

un nuevo programa de operaciones para los periodos $\{t2 - t5\}$. En ese instante, el planificador debe decidir si continuar o no con la inyección de producto $P2$ (“batch” $B7$), tal como lo sugiere el programa ilustrado en la Figura IV.20.

La Tabla IV.7 reporta los requerimientos actualizados de combustibles en las terminales $D1$ a $D5$ para las semanas $t2$, $t3$ y $t4$, periodos que ya habían sido contemplados en una instancia previa de planeación.

Tabla IV.7. Actualización de Demandas para los Periodos $t2$ a $t4$ en el Instante de Finalización de la Primera Semana $t1$

		Requerimientos de Productos [10^2m^3]																			
		D1				D2				D3				D4				D5			
		t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4
P1	TD	40	30	50	50	100	100	150	120	90	120	100	110	140	180	170	150	100	120	90	100
	SD	40	30	0	0	100	0	0	0	90	0	0	0	140	180	170	60	100	120	90	0
	RD	0	0	50	50	0	100	150	120	0	120	100	110	0	0	0	90	0	0	0	100
	UD		0	0 [†]	50		100	150	120		120	100	110		0	0	90		0	0	100
	UI		50				30				20				50				50		
P2	TD	100	120	100	120	100	100	100	110	70	80	70	60	200	200	200	220	220	210	250	220
	SD	100	40	0	0	100	0	0	0	70	80	70	6	200	152,5	0	0	220	210	132,5	0
	RD	0	80	100	120	0	100	100	110	0	0	0	54	0	47,5	200	220	0	0	117,5	220
	UD		80	100	120		100	100	110		0	0	54		47,5	200	220		0	107,5 [†]	220
	UI		90				50				90				150				150		
P3	TD	30	40	30	20	-	-	-	-	20	30	20	30	50	60	50	40	30	20	20	40
	SD	30	40	0	0	-	-	-	-	20	30	20	0	50	60	50	10	30	20	20	40
	RD	0	0	30	20	-	-	-	-	0	0	0	30	0	0	0	30	0	0	0	0
	UD		0	30	20		-	-	-		0	0	30		0	0	30		0	0	0
	UI		20				-	-	-		20				20				20		
P4	TD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	80	60	70	70	80	60	90
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60	10	0	0	70	15	0	0
	RD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	70	60	70	0	65	60	90
	UD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70	60	70	65	60	90	-	-
	UI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-	25	-	-	-

TD: Demanda Total pronosticada para los periodos t1-t4 al inicio del periodo t1 (t=0 h)

SD: Demanda Satisfecha durante el periodo t1, con material de inventario y lotes transferidos desde la línea

RD: Demanda Residual al final de t1 (t=168 h) según valores pronosticados una semana antes

UD: Demanda Actualizada a partir del ingreso y/o cancelación de órdenes de transporte al inicio de t2

UI: Inventario Actualizado de combustibles al inicio del periodo t2

La primera línea correspondiente a cada producto presenta las demandas pronosticadas una semana atrás (TD), mientras la segunda línea provee información sobre el volumen de combustible que fuera transferido hacia el mercado (incluso con anticipación) durante el periodo $t1$ (SD), adelantando la entrega de partes de las ordenes comprometidas. El tercer parámetro (RD) calcula la fracción de demanda que restaría satisfacer ($TD - SD$) valor que contrasta con la demanda efectiva (UD) prevista para los

períodos $\{t_2 - t_4\}$, luego de incorporar las modificaciones que sufren las órdenes. Por último, la quinta línea (UI) reporta el nivel de combustible que dispone cada una de las terminales al momento de abordar la reprogramación semanal. Este dato puede obtenerse directamente del plan de operaciones ejecutado durante la primera semana, adicionando al stock inicial el material que se recibe desde el poliducto, y descontando los despachos efectivos hacia el mercado.

La Figura IV.21 ilustra el mejor programa de operaciones hallado en la segunda instancia de planeación. En el diagrama puede develarse la respuesta a la inquietud planteada respecto del lote B7: el envío de combustible P2 iniciado en la primera semana debe interrumpirse al comenzar el período t_2 , para introducir un volumen adicional de combustible P4, luego de las correspondientes operaciones de recambio o “changeover”. El programa actualizado involucra un total de seis nuevas ejecuciones $\{B_8, B_9, B_{10}, B_{11}, B_{12}, B_{13}\}$, que introducen, en orden cronológico, $120,00_{P_4} - 1234,63_{P_1} - 250,00_{P_3} - 180,37_{P_1} - 1549,00_{P_2} - 1015,00_{P_1}$, expresados en unidades volumétricas del combustible que aparece como subíndice. Además de la detención inmediata del bombeo de P2, existen otros cambios significativos en la serie de lotes a introducir en la tubería, especialmente en aquellos planeados hacia el final del horizonte previo (ver Figuras IV.20 y IV.21).

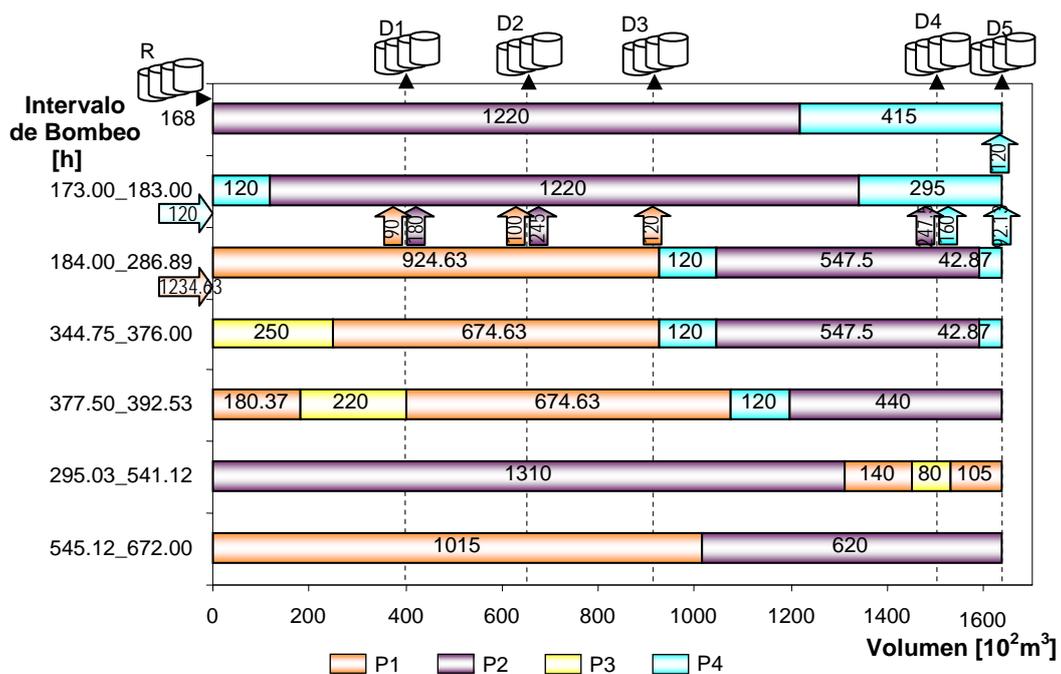


Figura IV.21. Programa de operaciones para el horizonte $\{t_2-t_5\}$

La secuencia de “batches” inicialmente propuesta $1282,50_{P1}/430,37_{P3}/1180,00_{P1}$, ha sido alterada por: (i) la introducción temprana del lote de $P4$ (120,00 unidades) anticipando la atención de nuevos requerimientos; (ii) una importante reducción en el tamaño del segundo envío de $P1$, de 1180,00 a 180,37 unidades; y (iii) la inyección de un nuevo lote de $P2$ al final de la secuencia (1549,00 unidades). El lote $B8$ transporta producto $P4$ desde el inicio del nuevo horizonte $\{t2 - t5\}$, para atender las recientes órdenes solicitadas en los depósitos $D4$ y $D5$ con “due-date” dd_{t5} . De no anticipar su inyección, el combustible $P4$ podría no alcanzar a tiempo las terminales más alejadas. Las variaciones en el tamaño de los “batches” finales del horizonte previo $\{t1 - t4\}$, de $(400,37_{P3} ; 1180,00_{P1})$ a $(250,00_{P3} ; 180,37_{P1})$, pueden justificarse con relativa facilidad. En un principio, los dos últimos envíos del plan original, con productos $P3$ y $P1$ (especialmente este último) estaban destinados a impulsar a los envíos previos hasta su punto de egreso. Sin embargo, se desconocía el propio destino de ambos lotes, pues se ignoraban las demandas correspondientes al período futuro ($t5$). A medida que se incorporan las órdenes de transporte de combustibles $P1$, $P2$, $P3$ y $P4$ para el período $t5$ en las terminales más distantes ($D4$ y $D5$), los lotes de $P3$ y $P1$ se van reduciendo estrictamente a los volúmenes requeridos, y aparecen nuevos envíos como el de $P4$. De forma similar a lo ocurrido en una instancia previa, dos grandes lotes ($1549,00_{P2}$ y $1015,00_{P1}$) se disponen hacia el final del programa con el objeto de hacer llegar a los “batches” en tránsito hasta las terminales de recepción.

Programa de Transporte Dinámico Finalmente Ejecutado sobre $\{t1 - t4\}$

Al finalizar la segunda semana ($t = 336$ h), sólo se han implementado las acciones programadas para el nuevo período de acción $t2$, es decir, la inyección de dos lotes adicionales: $120,00_{P4}$ y $1234,63_{P1}$. Una vez disparada la instancia de reprogramación, el próximo paso consiste en capturar el escenario de combustibles en depósitos y en tránsito dentro de la tubería. Repitiendo el procedimiento en forma iterativa, el horizonte de planeación rueda desde $\{t1 - t4\}$ a $\{t2 - t5\}$, luego a $\{t3 - t6\}$, y finalmente a $\{t4 - t7\}$, incorporando datos sobre las nuevas solicitudes del último período, que modifican considerablemente el plan de transporte original. La secuencia definitiva de corridas de bombeo ejecutadas en cada período de acción, así como la distribución de los combustibles entre las distintas terminales, sufren

alteraciones mayores respecto del primer programa proyectado para los periodos $t1 - t4$ (ver Figura IV.22).

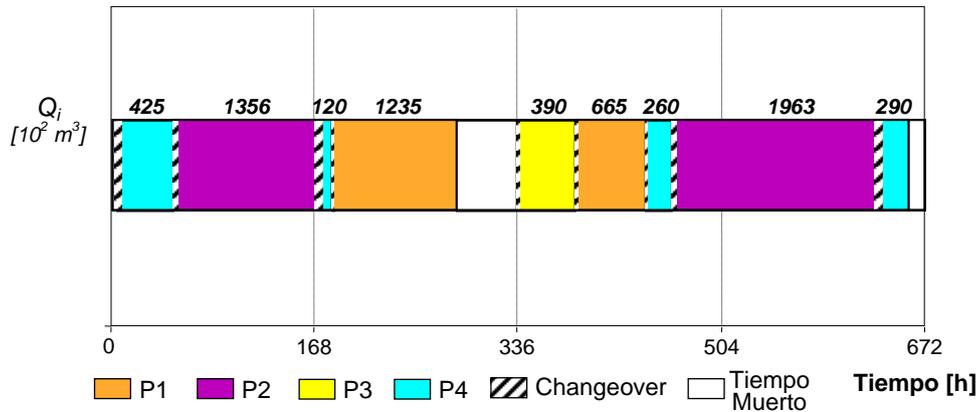


Figura IV.22. Diagrama de Gantt del Programa Dinámico de Bombeo

El diagrama de la Figura IV.23 resume el plan de transporte dinámico finalmente ejecutado por el despachante del poliducto sobre el horizonte de 28 días. El mismo comprende un total de diez ejecuciones o corridas de impulsión: $[425,00_{P4}, 1356,00_{P2}, 120,00_{P4}, 1234,63_{P1}, 390,00_{P3}, 665,37_{P1}, 259,62_{P4}, 449,04_{P2}, 1513,96_{P2}, 290,38_{P4}]$, expresados en cientos de m^3 del combustible enunciado como subíndice. Si se compara esta secuencia definitiva frente a los cinco lotes originales propuestos en el primer plan (ver Figuras IV.20 y IV.23) pueden observarse diferencias notorias. Más aún, los tres envíos inyectados durante el período $t3$ ($390,00_{P3}, 665,37_{P1}, 259,62_{P4}$) difieren de aquellos proyectados en la Figura IV.21 ($250,00_{P3}, 180,37_{P1}, 1549,00_{P2}$) cuando todavía se desconocían las demandas para $t6$ y $t7$.

A fin de atender las necesidades de los mercados de consumo, el poliducto permanece activo desde la hora $t = 0$ hasta $t = 659,44$, con una detención temporaria en el intervalo $[286,89 - 336,00]$, dado que no se requiere utilizar al máximo la capacidad de transporte (ver Figura IV.22). El programa de producción de la refinería para el horizonte $\{t1 - t4\}$, el cual se supone invariable en el tiempo, prevé la obtención de combustible $P3$ recién a partir de la hora 336 (inicio de la tercera semana). Como los tanques de la estación cabecera no disponen de material suficiente para inyectar el lote de $P3$ planeado en el poliducto, el inicio del bombeo de ese lote se retrasa hasta el principio del período $t3$, momento en que los tanques comienzan a recibir producto $P3$ desde la refinería.

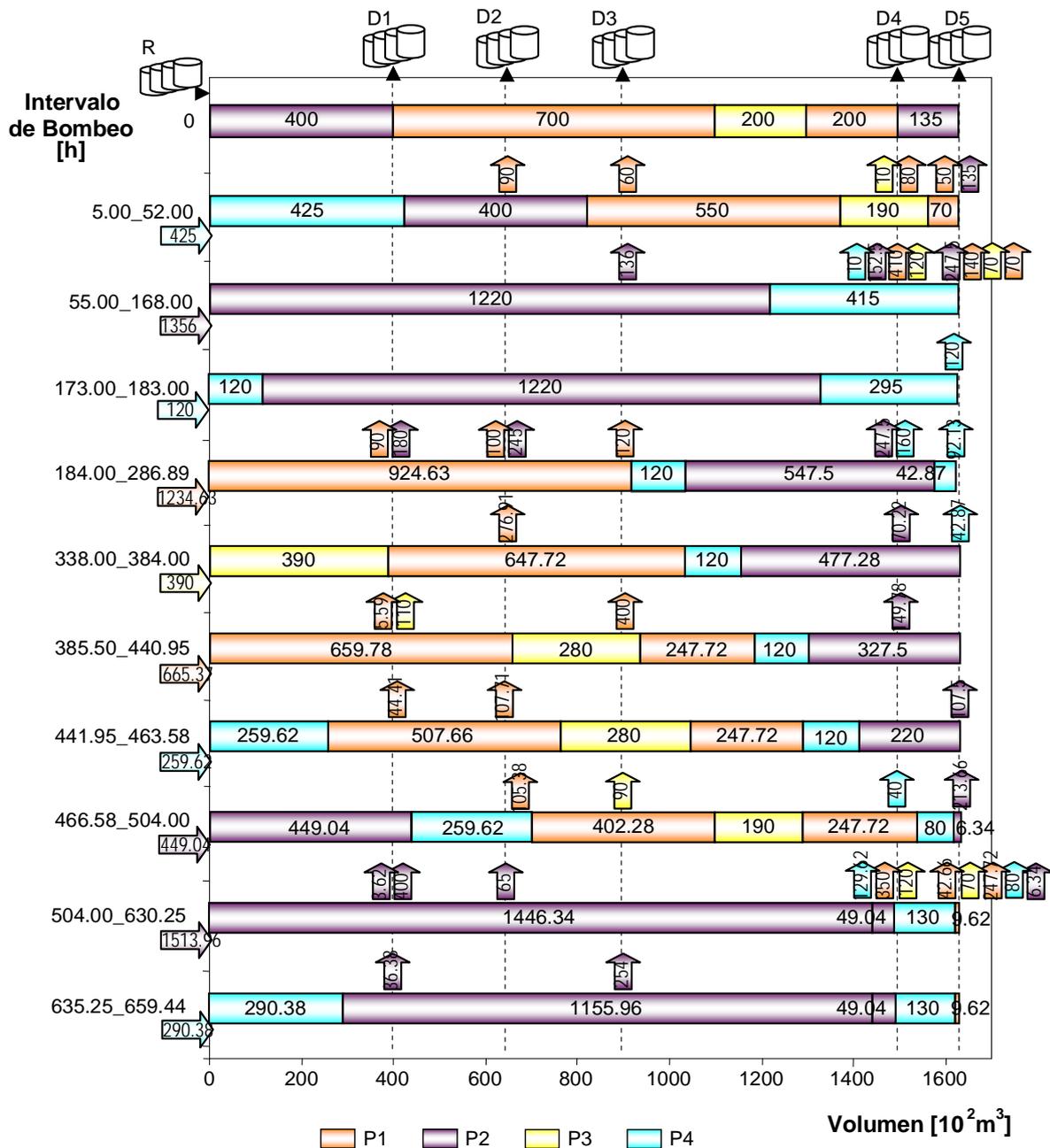


Figura IV.23. Programa Dinámico de Transporte para el Horizonte $\{t1 - t4\}$

Aun adelantando la atención de una parte importante de las necesidades de cada terminal, el sistema de transporte presenta un tiempo inactivo de 61,67 horas, dentro de las 672 horas que componen el horizonte, esto es, un nivel de utilización cercano al 90%. Tal como fuera mencionado, la Figura IV.23 ilustra el programa de operaciones definitivo implementado sobre el horizonte multi-período $\{t1 - t4\}$. Asimismo, el diagrama describe la evolución de los lotes dentro de la tubería, a medida que son desplazados por envíos posteriores.

Las variaciones de los niveles de combustible en tanques de la estación cabecera se representan en la Figura IV.24. Allí se evidencia el modo en que el algoritmo dinámico coordina la planeación del transporte a través del poliducto con el programa de refino propuesto como información de entrada. Los caudales de inyección de combustibles en la línea superan ampliamente a la velocidad de carga de los tanques desde la refinería, lo que exige el máximo cuidado para mantener los inventarios dentro del rango de valores permitidos. Por otro lado, en los centros de recepción, una vez despachado el stock inicial hacia los mercados de consumo, el nivel de combustibles en tanques se conserva en todos los casos en el valor mínimo admisible, debido a los altos costos imputados. En otras palabras, el material transferido desde el poliducto se despacha directamente a plaza, apenas arribado a los tanques.

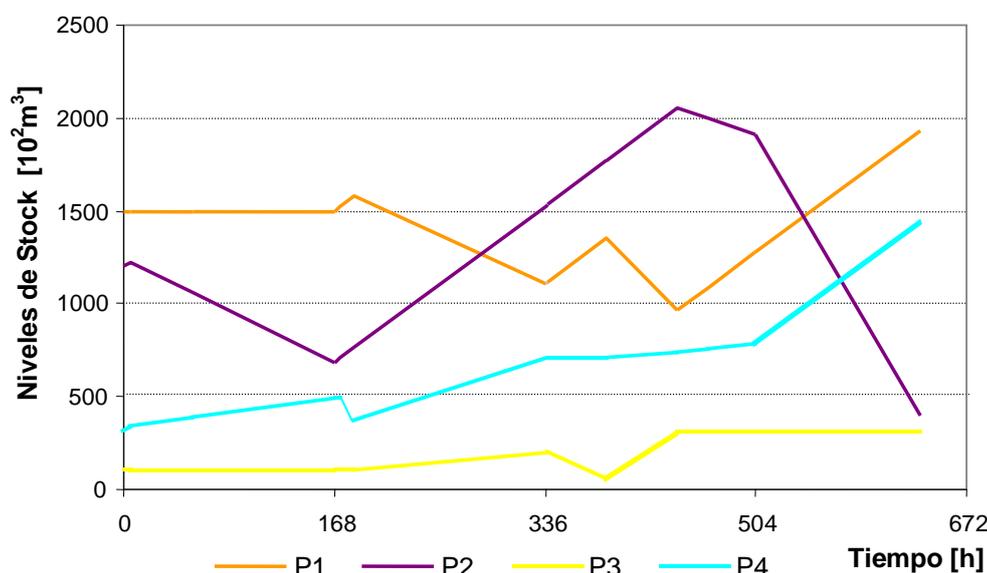


Figura IV.24. Niveles de Stock Proyectados en Tanques de la Estación Cabecera para los Periodos t_1 - t_4

Los requerimientos computacionales y las dimensiones del modelo dinámico para las sucesivas instancias de replanificación se detallan en la Tabla IV.6. A medida que el número de nuevos envíos se incrementa, el tiempo de resolución también es más alto. Como información complementaria, se ha podido comprobar que cuando los niveles de stock inicial en depósitos se reducen un 25%, la secuencia de productos impulsados permanece inalterable, y el tamaño de los envíos debe incrementarse, reduciéndose significativamente el número de órdenes cubiertas con anticipación.

IV.8.3 Ejemplo IV.2: Programa de Refino Dinámico

El segundo ejemplo de aplicación aborda el mismo problema real del poliducto OSBRA (Brasil) introducido en secciones previas, pero en este caso en particular el programa de producción de la refinería sufre algunas modificaciones a medida que el horizonte de planeación rueda en el tiempo. Este tipo de eventos ocurren con frecuencia en la práctica, y pueden tener un impacto profundo en la robustez del programa de transporte original. El modelo de planeación propuesto es capaz de manejar los cambios que afectan al programa de refino, de manera tal de conservar una coordinación ajustada entre las operaciones de producción y transporte de los combustibles. De no ser así, la línea debería detenerse en forma inesperada cada vez que se agote la disponibilidad de una especie, hasta tanto la refinería provea a la estación cabecera con el volumen requerido. La consecuente pérdida de tiempo productivo provoca una merma en el nivel de utilización del sistema, que podría haberse evitado. Análogamente, la producción anticipada de un combustible en la unidad de refino, de no ser prevista por el operador del poliducto, obliga a tomar medidas tan drásticas como ineficientes en el plan de transporte.

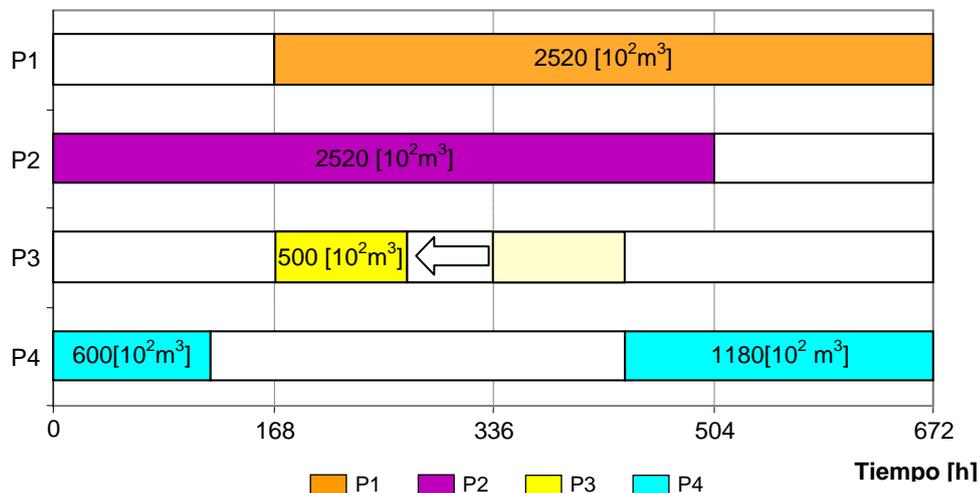


Figura IV.25. Programa de Refino de Combustibles Modificado (Ejemplo IV.2)

Supongamos que la campaña de refino de combustible P3, inicialmente programada a partir de la hora 336 (comienzo de la tercera semana), ha podido adelantarse una semana ante la inquietud planteada por el operador del poliducto respecto del intervalo de inactividad (ver Figura IV.25). El nuevo tiempo de inicio de la campaña de producción se comunica desde la refinería

en el transcurso del primer período, y podrá tenerse en cuenta en la primera instancia de reprogramación, llevada a cabo al finalizar el período $t1$ (hora 168). A pesar de la modificación horaria, el tamaño y la duración de la campaña de $P3$ se mantienen inalterables. Al iniciar $t2$, el sistema de planeación dinámica incorpora el nuevo escenario existente, de modo de reprogramar las operaciones del poliducto en forma efectiva. A diferencia del Ejemplo IV.1, el lote de $P3$ podrá introducirse a tiempo en el origen de la tubería, sin necesidad de retrasar su transporte hasta disponer de producto.

El nuevo programa de transporte para el horizonte $\{t2 - t5\}$ se describe en la Figura IV.26. Es importante notar que la configuración del poliducto y la evolución de los combustibles dentro de la línea presentan patrones similares al ejemplo anterior (ver Figuras IV.21 y IV.26). Sin embargo, el sistema permanece operativo durante todo el período de acción $t2$ (desde la hora 168 a la hora 336), exceptuando las transiciones entre combustibles, gracias a la disponibilidad anticipada de $P3$ en tanques de origen. Como resultado, el tiempo de inactividad de la línea se reduce 49,11 horas, elevando considerablemente el nivel de utilización de la capacidad de transporte instalada. Para lograrlo, el conjunto de lotes impulsados durante la segunda semana se incrementa de uno a cuatro.

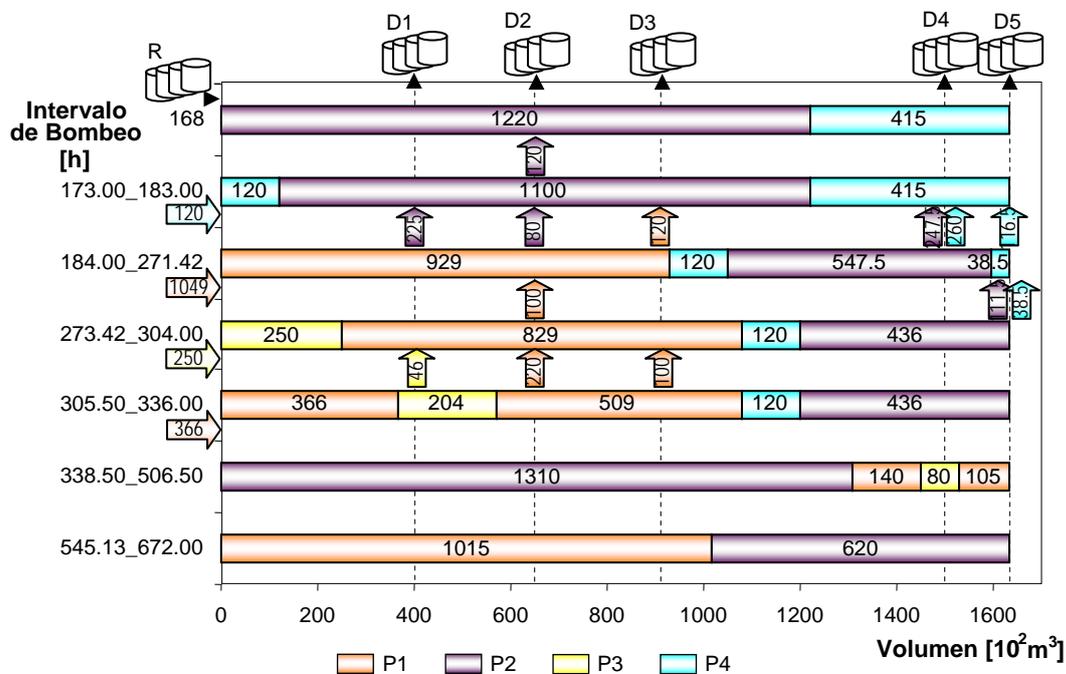


Figura IV.26. Programa de Transporte Reformulado para los Periodos $t2$ - $t5$ (Ejemplo IV.2)

El programa dinámico óptimo busca maximizar el uso del sistema de transporte por tuberías, integrando en forma eficiente las actividades de producción y distribución de los combustibles, en la compleja red de suministro de energía. Por lo que se sabe, las empresas petroleras que operan poliductos adoptan un programa de producción dado “a priori”, según la disponibilidad de crudos, con muy poca atención puesta sobre las órdenes de transporte solicitadas en cada centro de recepción. De esta forma, es sumamente difícil alcanzar una correspondencia precisa entre las operaciones de refino y distribución. En respuesta a ello, el enfoque dinámico presentado a lo largo de este capítulo asistirá a los planificadores de la refinería a ajustar adecuadamente su programa de producción al tamaño de las órdenes de transporte y fechas de entrega pactadas con los clientes, para atender requerimientos futuros en las terminales de distribución. Como se demuestra a través del Ejemplo IV.2, la integración de operaciones entre la unidad de refino y el sistema de transporte por poliductos genera beneficios importantes para la gestión de la cadena de suministro, incrementando en forma notable la utilización de estos medios de transporte tan valiosos.

IV.9 Conclusiones Preliminares

Mediante la extensión del modelo continuo básico del problema de programación del transporte de combustibles por ductos, es posible abordar sistemas más complejos, con múltiples terminales de carga a lo largo del trayecto. Al mismo tiempo, el uso de un horizonte multi-período permite considerar varias fechas de entrega o “due-dates” en el instante de culminación de cada período. Enfoques previos, la mayoría de ellos de naturaleza discreta, también fueron aplicados a poliductos con múltiples terminales de recepción, pero con una única fecha de entrega al final del horizonte. El modelo matemático MILP propuesto en este capítulo de la tesis permite resolver el mismo problema con múltiples “due-dates”, a un costo computacional significativamente menor. Más aún, el enfoque continuo fue extendido para aplicarlo a entornos dinámicos, con frecuentes cambios en el escenario de demandas en las terminales de distribución. A ese fin, se reemplazó el horizonte estático usado en todos los trabajos previos por un horizonte rodante, y se desarrolló una estrategia de revisión periódica del

programa de operaciones sobre la base de datos de demanda actualizados, a la finalización de cada período de acción.

La implementación del algoritmo dinámico a un caso de estudio de dimensiones reales de la industria petrolera moderna, muestra que la secuencia de corridas de bombeo finalmente ejecutada a lo largo del plan difiere en forma notoria respecto de los resultados reportados por las técnicas convencionales aplicadas a horizontes estáticos. Las ejecuciones se tornan cada vez más cortas, y el número de corridas aumenta. En el Ejemplo IV.1, los nuevos lotes inyectados en el poliducto se incrementan de cinco a diez. Estas modificaciones son provocadas por el reemplazo sistemático de grandes lotes de material de relleno (“filler product”) por partidas cada vez más ajustadas de combustibles, que serán demandados por las terminales de carga en el futuro más próximo.

De acuerdo a las nuevas características del modelo de planeación dinámica propuesto, no se introducen lotes finales con el único objetivo de impulsar envíos previos, sino que su inyección está siempre orientada a la atención de órdenes de combustible en horizontes futuros. De esta forma, el tiempo de inactividad de la línea prácticamente se anula, y la utilización del sistema de transporte se incrementa un 21%. El costo computacional del proceso resolutivo crece a medida que el horizonte rueda, pues se requiere de la inyección de un número cada vez mayor de lotes. No obstante, en todos los casos el tiempo de CPU es muy razonable, variando de 16 a 330 segundos sobre horizontes de 672 horas. El nuevo enfoque puede ser implementado con facilidad en sistemas de programación empresariales, incorporando conceptos de planeación avanzada como los períodos de congelamiento estricto o leve, para restringir las modificaciones introducidas en el proceso de revisión. Asimismo, el modelo dinámico es lo suficientemente flexible como para adaptar el programa de bombeo del poliducto, en función de los continuos cambios en los requerimientos de las terminales y en el programa de refino de las unidades productivas. Esto origina, a menudo, variaciones en las asignaciones parciales de lotes ya inyectados a los diferentes destinos.

Capítulo V

Planeación del Transporte por
Poliductos con Múltiples
Puntos de Ingreso de
Combustibles

V.1 Introducción

Hasta aquí, el desarrollo del presente estudio se ha enfocado a la planeación de operaciones en poliductos que presentan un único punto de ingreso para todos los combustibles. Sin embargo, poliductos troncales extendidos sobre territorios más amplios suelen prestar servicios de transporte a más de una empresa de refino, con instalaciones productivas distribuidas a lo largo del tendido. En poliductos compartidos o “common-carriers”, varias compañías utilizan la misma línea para transportar sus propios combustibles hacia destinos alejados. Estos sistemas constituyen poliductos con múltiples nodos-fuente o terminales de ingreso, en puntos intermedios del trayecto. La Figura V.1 representa el sistema de tuberías “Plantation”, en los EE.UU. Se trata de poliductos unidireccionales que comunican las refinerías y depósitos de la región del Golfo de México con la ciudad de Washington, DC, en la costa este del país. El sistema presenta múltiples terminales de ingreso de productos (Dock, Baton Rouge, Collins, Helena) y diversos puntos de recepción a lo largo del recorrido (Atlanta, Charlotte, Washington, entre otros).

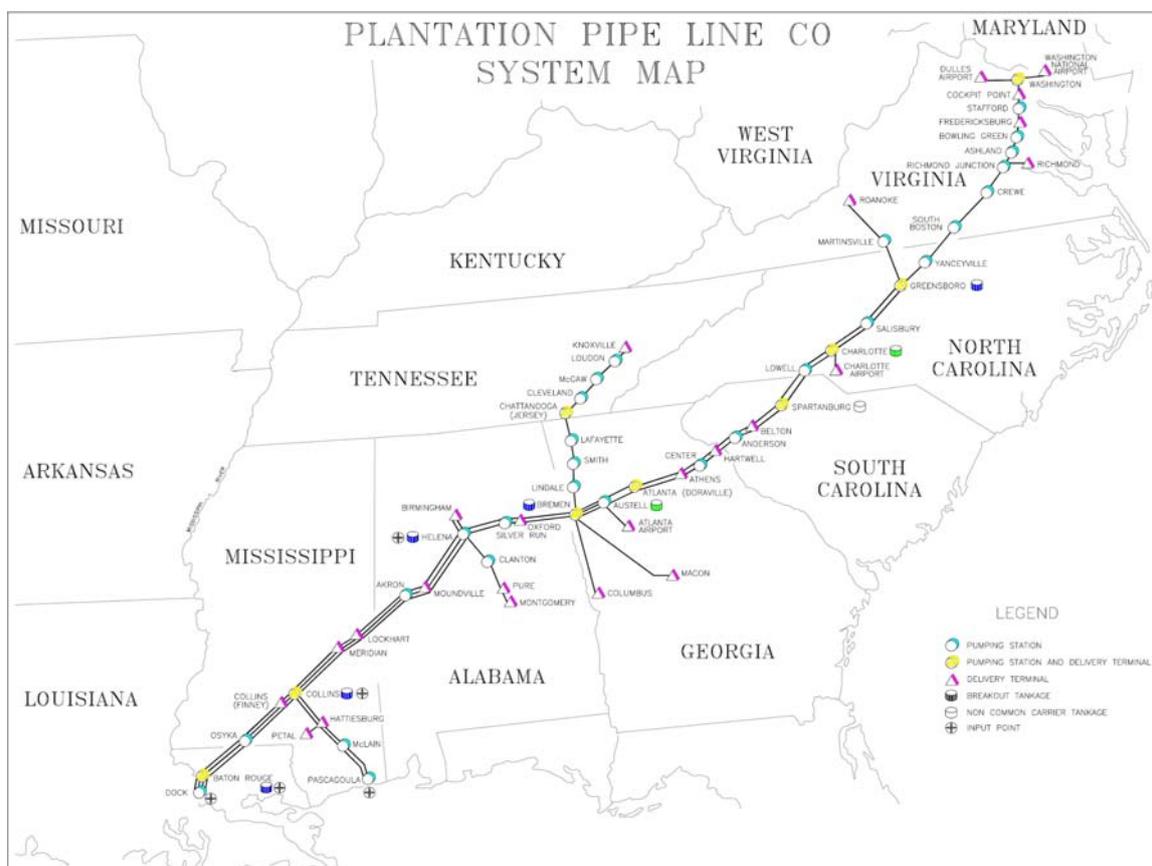


Figura V.1. Sistema de Poliductos “Plantation”(EE.UU.) con Múltiples Puntos de Ingreso y Descarga de Combustibles

Colonial Pipeline Company						
		PRODUCT SPECIFICATIONS				
3.12.2		CONVENTIONAL PREMIUM GASOLINE BLENDSTOCK (CBOB) FOR BLENDING WITH 10% DENATURED FUEL ETHANOL (92% PURITY) AS DEFINED IN ASTM D4806 ATLANTA/BIRMINGHAM GASOLINE				
Cancels Previous Issues of T grades						
FUNGIBLE ONLY REQUIREMENTS:						
		ASTM Test		Test Results		
<u>Product Property</u>		<u>Method</u>	<u>Minimum</u>	<u>Maximum</u>	<u>Note</u>	
Benzene (vol%)		D3606		4.9		
Color				Undyed		
Corrosion (Cu) 3 hrs @122°F (50°C)		D130		1		
Corrosion (Ag) 3 hrs @122°F (50°C)		D4814-04b Annex A1		1		
Doctor test		D4952		Negative (sweet)	5	
or						
Mercaptan sulfur, wt.%		D3227		0.002		
Existent Gum mg/100 ml		D381		4		
Gravity °API at 60°F		D287,D1298, D4052	Report		7	
Oxidation stability-minutes		D525	240			
Phosphorous, gms/gal		D3231		0.004		
Sulfur (ppmwt)		D2622		80	8	
		or equivalent				
Nace Corrosion		TM0172-2001	B+ (Origin)		7	
<u>Volatility:</u>						
Driveability Index		D4814		See Chart		
Distillation, °C (°F) @ %Evap.		D86				
Vapor/Liquid Ratio (V/L), °C (°F) @ 20					6	
		D5188 (See Note 6)				
	Driveability	10 vol%	50 vol%		90 vol%	End Pt.
<u>Grades</u>	<u>Index</u>	<u>Max</u>	<u>Min</u>	<u>Max</u>	<u>Max</u>	<u>Max</u>
T0,T1,T2	1250	70(158)	66(150)	121(250)	190(374)	221(430) 49(120)
T3	1230	60(140)	66(150)	116(240)	185(365)	221(430) 45(113)
T4	1220	55(131)	66(150)	113(235)	185(365)	221(430) 42(107)
T5	1200	50(122)	66(150)	110(230)	185(365)	221(430) 41(105)

1. All T grades may not contain oxygenates, such as ethers and alcohols. The use of non-hydrocarbon blending components in these grades is prohibited.
2. Refer to test methods published in 40 CFR Chapter 1, Part 80.46. Alternative aromatics and oxygenates test methods, ASTM D1319 and ASTM D 4815, may be used according to federal and state regulations.
3. For products blended to meet EPA or state imposed summer VOC requirements, tests must be performed in accordance with the procedures described in 40 CFR, Part 80.
4. Reserved.
5. Mercaptan Sulfur waived if fuel is negative by Doctor test.
6. Computer and Linear methods may be used to determine V/L value. D5188 will be the referee method
7. Specifications must be met before blending of denatured fuel ethanol.
8. Refer to 40 CFR Part 80.195 (d)(2). Alternative sulfur test methods, ASTM D 5453 and D 7039, may be used according to federal and state regulations.

Cycles 22 through 49, grade T2 is not designated as Atlanta/Birmingham gasoline

June 2009

Figura V.2. Hoja Técnica con Especificaciones para una Nafta Premium Transportada en Modo Fungible por el Sistema Colonial Pipeline (EE.UU.)

Poliductos compartidos o “common-carriers” pueden operar en dos modos diferentes: (a) específico o segregado, y (b) fungible o consolidado. En modo segregado, la identidad del producto se conserva a lo largo del recorrido, y el mismo material que ingresa al sistema en un punto de acceso se descarga en el destino especificado. Por el contrario, en modo consolidado el operador del poliducto no necesariamente entrega al destino el mismo lote de combustible inyectado en la terminal de ingreso que solicita el servicio. En

caso de no proceder de la misma refinería, el material descargado deberá cumplir estrictamente con las especificaciones que establece el operador para cada especie estandarizada. Dada la economía de este modo operativo, hasta las naftas “premium” suelen transportarse como productos fungibles, con restricciones muy precisas. La Figura V.2 describe el listado de especificaciones técnicas que impone el sistema “Colonial” (EE.UU.) al transporte de nafta premium convencional, para mezclas con 10% de etanol (CBOB).

La planeación de operaciones en poliductos es sin dudas un problema industrial de gran interés, que ha captado la atención de diversos grupos de investigación en el área. No obstante, el uso compartido del recurso por más de una empresa incorpora nuevas aristas al problema, que aún no habían sido estudiadas en detalle. En todo sistema de transporte por ductos, el programa de operaciones debe indicar el lugar, el tiempo y la secuencia en que se desarrollan las actividades de impulsión y derivación de combustibles hacia las terminales logísticas, y comprende los llamados programas de *inyección* y *descarga*. Por un lado, el *programa de inyección* establece la secuencia de ingreso de lotes al sistema, el combustible impulsado, la dimensión de los “batches”, y la estación de acceso donde se inicia el traslado. Se busca inyectar lotes tan grandes como sea posible, de manera tal de reducir el número de interfases sin incurrir en retrasos de entregas. Esto se logra a partir de consolidar envíos que involucran al mismo tipo de combustible estandarizado, aun cuando los lotes provengan de refinerías distintas y se inyecten en diferentes terminales. Por otra parte, el *programa de descarga* define las operaciones de corte y derivación de lotes, el combustible transferido, y las cantidades asignadas a las terminales de recepción en cada corrida.

La operación de estaciones intermedias para la inyección de productos al sistema plantea nuevos desafíos, cada vez más complejos. Las corridas de impulsión que parten de nodos intermedios pueden introducir un nuevo lote en la línea, o incrementar el tamaño de un “batch” en tránsito, incorporando un volumen adicional del mismo producto que viene siendo transportado. Como consecuencia, los envíos no necesariamente se desplazan dentro de las tuberías en el mismo orden en que fueron introducidos, y el seguimiento de los lotes se torna aún más difícil. A lo largo de este capítulo, se presentará una formulación enteramente continua en las escalas de tiempo y longitud,

buscando generar un programa de transporte óptimo para poliductos con múltiples entradas que operan tanto en modo específico o segregado como en modo fungible o consolidado. El modelo será aplicado a casos de estudio que involucran el transporte de tres combustibles refinados, desde dos fuentes de ingreso hacia tres terminales de recepción, en horizontes de planeación de hasta diez días.

Planeación de Sistemas de Poliductos con Múltiples Ingresos

En poliductos compartidos o “common-carriers”, diversas refinерías ubicadas en sitios distantes utilizan la misma tubería para impulsar sus combustibles hacia las terminales de distribución próximas a los grandes mercados de consumo (ver Figura V.3). En los capítulos previos, tal como en la mayor parte de los trabajos publicados en la literatura, los sistemas bajo estudio constan de una única estación cabecera (o terminal de acceso) ubicada en el origen de la tubería, con uno o múltiples centros de recepción de material a lo largo del trayecto. Los poliductos con múltiples ingresos incorporan un número mayor de terminales para la entrada de combustibles en puntos intermedios del recorrido. Allí se colectan lotes producidos por las refinерías de la región, que deben transportarse hacia centros de distribución alejados. En síntesis, estos complejos sistemas movilizan múltiples productos desde varias fuentes a diversos destinos.

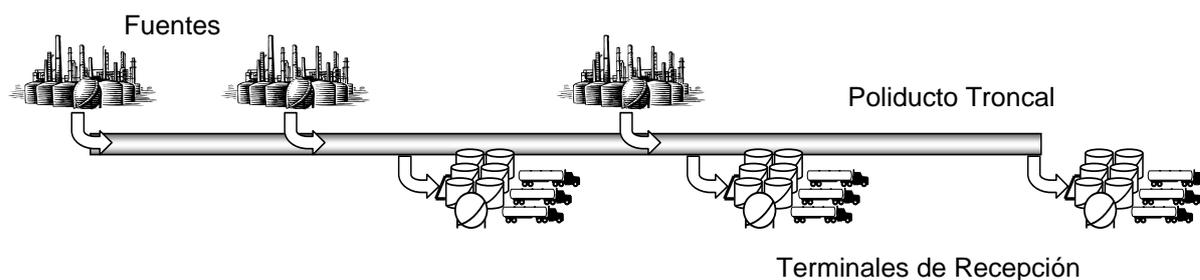


Figura V.3. Sistema de Transporte con Múltiples Puntos de Acceso

Como lo expresaran los autores Hane y Ratilff (1995) en uno de los primeros trabajos sobre programación del transporte por ductos, el manejo de múltiples puntos de ingreso deviene en enormes dificultades, que pueden ignorarse en el tratamiento de tuberías con acceso simple. Supongamos que un poliducto troncal opera en modo fungible o consolidado. Por lo tanto, los

envíos individuales de un mismo grado de combustible que cumplen con las mismas especificaciones pueden combinarse en único lote para abastecer a varios destinos. De esta manera, es posible que un lote de combustible A proveniente de la refinería $S1$, con destino al depósito $D1$, se entregue finalmente al destino $D2$, que también espera la recepción de producto A pero desde $S2$. La operación de sistemas de múltiples ingresos implica la ejecución de una secuencia de corridas de bombeo, cada una de las cuales inyecta una cantidad determinada de combustible en uno de los puntos de ingreso al poliducto. Una diferencia fundamental respecto de los sistemas con refinería única es la necesidad de especificar la terminal de entrada activa, que bombea material dentro de la línea.

Otra de las características distintivas de los poliductos “common-carriers” es la posibilidad de introducir nuevos lotes en puntos intermedios del recorrido y la complejidad adicional que ello conlleva. En efecto, los lotes que transitan por el interior de la tubería no necesariamente estarán secuenciados según el orden en que fueron inyectados. En conductos de acceso simple, por el contrario, la secuencia de “batches” en tránsito sigue el orden en que ingresan al sistema. En ese caso, el lote $B3$ será inmediatamente sucedido por el lote $B4$, pues $B4$ se introduce (en el mismo punto de ingreso) justo después de $B3$. Como se expusiera en capítulos precedentes, existe para esos casos una relación uno-a-uno entre nuevos lotes y corridas de bombeo, y una entidad matemática común puede utilizarse para representar ambos elementos. Por el contrario, en sistemas con múltiples ingresos, un lote no siempre es precedido por aquél que fuera impulsado en la instancia inmediata anterior. En la Figura V.4, el lote $B4$ se inyecta en el origen del poliducto (primer punto de ingreso) y el “batch” $B3$ se introduce en una estación intermedia. Es importante notar que $B3$ precede a $B4$ en el tren de envíos, aun cuando la inyección de $B4$ corresponde a una corrida previa.

En tuberías con un único punto de ingreso se verifica que el envío $(i + 1)$ no sólo se traslada justo detrás del lote i , sino que además es inyectado en el origen del sistema por una corrida inmediatamente posterior a i . En poliductos con múltiples terminales de entrada, las cosas son distintas. El lote $(i + 1)$, que fluye siguiendo al lote i , no necesariamente se impulsa dentro de la tubería luego de la inyección de i . Como resultado, en la programación de conductos con múltiples ingresos, las secuencias de “batches” y corridas de bombeo no siempre se ordenan en forma análoga, y deben por lo tanto, manejarse como

entidades independientes. La condición de secuencia cronológica de los “batches”, una hipótesis clave en capítulos previos, ya no puede suponerse válida. Con seguridad, esto complica significativamente la evaluación de los costos de reproceso de interfases, pues el seguimiento de la secuencia de combustibles transportados se torna más difícil.

En el ejemplo de la Figura V.4 se observa que el lote $B4$ ingresa a la línea en la terminal $S1$, durante la ejecución $K1$. Pese a que el envío $B3$ se introduce en una corrida posterior ($K2$), el lote $B4$ queda retrasado respecto del movimiento de $B3$. Esto sucede porque la inyección $K2$ se produce en la fuente intermedia ($S2$). Dicho de otro modo, el “batch” $B3$ inicia su recorrido delante del lote $B4$, que permanece en reposo durante la corrida $K2$.

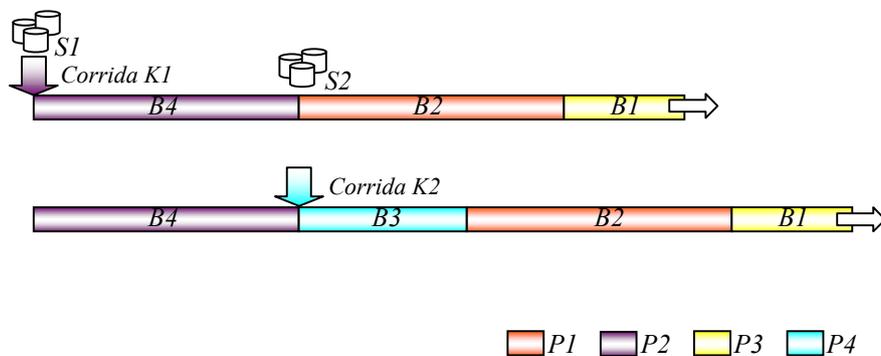


Figura V.4. Secuenciación de Envíos en Poliductos con Múltiples Ingresos

Una de las cuestiones clave en la operación de poliductos es el manejo de las interfases. Una mezcla típica entre dos combustibles distintos dentro de la misma tubería ocurre a partir del desplazamiento de un combustible liviano forzado por otro más pesado, que tiende a fluir por debajo del primero. Para reducir la contaminación entre las especies, es importante mantener la condición de flujo turbulento, aplanando el perfil de velocidades y minimizando las detenciones de las interfases en cada tramo. Al respecto, debe tenerse en cuenta que cuando un lote de combustible se inyecta en una terminal intermedia T_a , el tramo de tubería que une el origen del sistema con la ubicación T_a permanece inactivo, lleno de combustible en reposo. La reactivación o puesta en movimiento de este primer segmento se producirá a expensas de un costo relativamente alto, cuando la estación de origen comience a introducir un nuevo lote en el sistema. Ésta es una característica

operativa propia de los poliductos con múltiples ingresos de material. Similarmente, si T_b es la última terminal del sistema que recibe producto desde la línea en una dada ejecución, el tramo de tubería más allá de T_b también permanecerá detenido.

Por último, un aspecto crucial del transporte por tuberías comunes, estrechamente ligado al manejo de las interfases, consiste en conservar la *integridad* de los envíos. En la práctica, el operador de poliductos no puede inyectar un nuevo lote de combustible en algún punto intermedio, si al hacerlo, un “batch” en tránsito termina fraccionándose en dos lotes más pequeños. El objetivo es evitar la generación de nuevas interfases, minimizando así la degradación de los combustibles. En poliductos con múltiples ingresos que operan en modo fungible, las corridas de bombeo iniciadas en estaciones intermedias pueden: (i) insertar un nuevo lote de combustible en el tren de envíos, o (ii) inyectar un volumen adicional de producto, incrementando el tamaño de algún lote en tránsito. En el primero de los casos, el nuevo “batch” deberá intercalarse justo en la interfase entre dos envíos sucesivos, para evitar la partición y conservar la integridad de ambos lotes. La segunda alternativa requiere que el “batch” consolidado, que recibe una cantidad adicional de producto, pueda ser accedido desde la terminal de ingreso. En ambas situaciones, se busca mantener los costos asociados a la contaminación de combustibles tan bajos como sea posible. La opción de incrementar el tamaño de los lotes en tránsito a través de inyecciones parciales en terminales intermedias es una característica exclusiva de los sistemas de transporte con múltiples entradas que operan en modo fungible. Resumiendo, aquellas corridas de impulsión ejecutadas en puntos intermedios del trayecto no siempre generan nuevas interfases, a diferencia de lo que se propone al resolver casos con ingreso único. En ocasiones, sólo se busca aportar material a un lote ya introducido en una terminal aguas arriba, sin crear nuevas transiciones en el tren de envíos.

A lo largo de las próximas secciones, se describirá una formulación matemática MILP para la planeación del transporte de múltiples productos por tuberías que presentan más de una terminal de ingreso y recepción de combustibles, operando tanto en modo segregado como en modo fungible. El enfoque propuesto está basado en una representación rigurosa del problema, de tipo continua en dominios de tiempo y longitud.

V.2 Contribuciones Previas

Unas pocas contribuciones han presentado una discusión provechosa sobre la programación de poliductos con múltiples puntos de ingreso para los combustibles. Hane y Ratliff, en el año 1995, fueron los primeros en formalizar el problema de secuenciación de envíos de derivados del petróleo desde un nodo-fuente a diversas terminales receptoras. Su enfoque supone que la secuencia de lotes, conformada sobre la base de un patrón de bombeo cíclico, posee volúmenes conocidos, adoptados por el programador de la línea de acuerdo a su propio criterio, antes de resolver el problema. La metodología se propone hallar la secuencia de envíos más conveniente, de modo de minimizar una función objetivo que contempla costos de transporte y mantenimiento de las unidades impulsoras. El modelo se basa en una estructura de representación discreta, que permite manejar fácilmente el ordenamiento de los lotes dentro del poliducto. Asimismo, posibilita el desarrollo de esquemas de descomposición del problema en instancias más acotadas, que pueden irse resolviendo por medio de algoritmos clásicos de ramificación y cota (“branch-and-bound”). En la sección dedicada a los posibles trabajos futuros, los autores remarcan con claridad los aspectos críticos que deberían tenerse en cuenta a la hora de abordar la operación de sistemas con múltiples ingresos.

Sin embargo, transcurrieron varios años hasta que Jittamai, en su tesis doctoral del año 2004, logró extender el concepto introducido por Hane y Ratliff a sistemas con múltiples entradas. Este trabajo reciente destina una parte de su desarrollo a la programación de despachos en sistemas con ingreso único, en los cuales se impone una ventana de tiempo para la realización de las entregas. Al igual que Hane y Ratliff (1995), Jittamai (2004) utiliza una representación del problema de secuenciación basada en grafos de nodos relacionados. Como se demuestra que el problema es NP-completo, se propone un algoritmo de flujo reverso basado en reglas heurísticas para encontrar el programa de despachos que minimiza la violación de las ventanas de tiempo. En forma análoga al enfoque de Hane y Ratliff, la secuencia de inyección de lotes sigue un patrón cíclico, cuya duración por período se establece de antemano.

En el mismo trabajo, el algoritmo de flujo reverso fue modificado para considerar sistemas de transporte con múltiples ingresos. No obstante, se supone que cada uno de los combustibles sólo puede ser provisto por una y sólo una de las terminales de inyección, es decir, una única fuente por tipo de

producto. Más aún, cada “batch” posee un único destino, y el tamaño del envío coincide exactamente con la demanda especificada por la terminal receptora. Como resultado, la tubería funciona estrictamente en modo segregado, y la consolidación de lotes en estaciones intermedias es una operación inviable. El objetivo del problema consiste en minimizar el número de detenciones y arranques de cada segmento de la tubería por ciclo, buscando reducir los costos operativos vinculados a la utilización y el mantenimiento de bombas tanto como sea posible. La utilización del algoritmo de flujo reverso permite hallar la solución óptima de problemas sencillos en aproximadamente el 40% de los casos reportados, aunque, claro está, se trata de ejemplos muy simplificados. La principal debilidad del método pasa por ignorar los costos de transición entre lotes de combustibles disímiles.

En los últimos años, se publicaron algunas representaciones discretas del problema de programación de poliductos, que presentan dos o más refinerías donde se producen los combustibles (Neves y colab., 2007; Mori y colab., 2007; García y colab., 2008; Boschetto y colab., 2008; Moura y colab., 2008). Sin embargo, estos modelos no constituyen representaciones acordes al funcionamiento de sistemas “common-carriers”, con más de un punto de ingreso para los productos. Por el contrario, se basan en descomponer el sistema de transporte en múltiples tuberías simples, que colectan el material en un nodo y lo entregan directamente en otro. En toda tubería con origen y destino únicos, la secuencia de “packs” introducidos no se modifica en el trayecto, y alcanza el extremo opuesto exactamente en el mismo orden.

La principal debilidad de los modelos es suponer que el producto que ingresa a un tramo se descuenta siempre del stock disponible en el nodo de origen. Si, en simultáneo, la terminal recibe otro “pack” de igual tamaño y del mismo combustible desde otra tubería, la ecuación de balance volumétrico hace que se conserve un nivel estable de stock en tanques. No obstante, operaciones fundamentales como la transferencia directa de lotes de un poliducto a otro (“tightlining”), la consolidación de envíos de productos fungibles, y la conservación de la identidad, el ordenamiento cronológico y la integridad de los “batches” a medida que avanzan en su recorrido, son operaciones que el modelo no reconoce. Estas propuestas se estudian con mayor detalle en el capítulo siguiente, dedicado a la programación de redes de poliductos coordinados.

V.3 Elementos Principales del Modelo

El nuevo enfoque propuesto para la programación del transporte por poliductos troncales con múltiples terminales de ingreso y recepción de combustibles, involucra cinco conjuntos principales: (i) las ejecuciones o corridas de inyección (conjunto K), (ii) los lotes a impulsar (conjunto I), (iii) los productos transportados (conjunto P), (iv) las refinerías-fuente o terminales de ingreso (conjunto S), y (v) las terminales de recepción o destinos (conjunto J). Como podrá notarse, el problema incluye dos conjuntos adicionales respecto de las representaciones con origen único: K y S . Por su parte, el número de ejecuciones y lotes a transportar a través de la línea se desconoce de antemano, y debe adoptarse en forma arbitraria antes de resolver el problema. La regla general es elegir valores pequeños para evitar el crecimiento abrupto de las dimensiones del modelo, pero lo suficientemente grandes como para alcanzar el programa de transporte óptimo. La selección del tamaño de ambos conjuntos depende de la variedad de especies transportadas, el volumen típico de los envíos y la extensión del horizonte temporal.

V.3.1 Conjunto de Ejecuciones K

Definamos el conjunto $K = \{k_1, k_2, k_3, \dots, k_m\}$ en el cual cada una de las corridas de bombeo o ejecuciones k_1, k_2, \dots se presentan en orden cronológico. Por lo tanto, el ℓ -ésimo elemento de K , si es requerido por el programador, será ejecutado justo después de la corrida $(\ell - 1)$. Asimismo, sus tiempos de culminación satisfacen $C_\ell \geq C_{\ell-1}$, donde C_ℓ es el instante de finalización de la corrida ℓ . Cuando el número de ejecuciones que conforman el programa óptimo de bombeo (NR) es menor que el número de entidades propuestas ($|K|$), se cumple $kf = |K| - NR > 0$. Como consecuencia, kf elementos del conjunto original K nunca serán ejecutados por el programador, y se denominan corridas ficticias. Para eliminar soluciones alternativas similares (o soluciones simétricas) ciertas restricciones del modelo de optimización forzarán a las ejecuciones ficticias a ubicarse al final de la secuencia de elementos en K . Por el contrario, si la solución hallada presenta $kf = 0$, la cardinalidad del conjunto K se incrementa en uno, y la formulación del problema se resuelve nuevamente. El procedimiento se repite hasta que no se logra mejorar las soluciones, o alternativamente, $kf > 0$. Un buen valor inicial para el número de ejecuciones $|K|$ viene dado por:

$$|K| = \left[\sum_{p \in P} \left(\frac{2}{Q_{\min,p} + Q_{\max,p}} \sum_{j \in J} DL_{p,j} \right) \right]$$

donde $(Q_{\min,p}, Q_{\max,p})$ representan los valores mínimos y máximos admisibles para inyecciones de producto p en la tubería, y $DL_{p,j}$ simboliza el requerimiento mínimo de combustible p en la terminal de recepción j , a ser abastecido desde las distintas fuentes aguas arriba del sistema. A pesar de que está permitido introducir combustibles desde más de un punto de ingreso, las corridas de inyección se ejecutan de a una por vez, debido a restricciones operativas. En futuras secciones, se verá el modo de relajar esta condición para abordar redes de poliductos coordinados como los que operan en Argentina.

Cada corrida activa (no ficticia) está caracterizada por dos elementos: (a) la terminal de ingreso $s \in S$ donde se ejecuta, y (b) el lote $i \in I$ que se inyecta desde los tanques de la estación de origen. El elemento i puede ser un nuevo “batch” introducido en la tubería, o uno de los lotes en tránsito al que se le agrega un volumen adicional del mismo combustible que transporta. En el último caso, el envío i deberá estar correctamente posicionado para recibir material desde el nodo s . En cada instancia de bombeo k , algunos segmentos de la línea se activan, y los lotes que transitan por esos tramos avanzan en su recorrido, abasteciendo de combustibles a las terminales receptoras.

V.3.2 Conjunto de Lotes o “Batches” I

Por definición, el conjunto $I = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_n\}$ involucra a todos los lotes posibles de inyectar i_1, i_2, \dots dispuestos en el mismo orden en que transitan a través de la tubería. De este modo, el lote i_1 ocupa la posición más alejada respecto del origen de la línea, y es seguido por todos los demás elementos del conjunto. Los “batches” introducidos en horizontes previos ($i \in I^{old}$), que permanecen dentro del conducto antes de iniciar el plan, son los primeros elementos del conjunto I . Los demás componentes constituyen nuevos lotes ($i \in I^{new}$), a ser impulsados en corridas de bombeo planeadas para el horizonte futuro. En cualquiera de los casos, el lote ℓ se moviliza dentro del poliducto justo detrás del lote $(\ell - 1)$. Cabe destacar que el manejo aislado de lotes y corridas de impulsión permite alcanzar reducciones en el tamaño del conjunto I , tal como se explica a continuación. En programas de transporte que involucran una única refinería de origen, suelen presentarse intervalos de detención momentánea de las corridas de bombeo. Estas interrupciones evitan

la operación de bombas en períodos de alto costo energético, siempre y cuando se disponga de capacidad de transporte remanente. En otras palabras, se plantea la inyección de un lote ($\ell - 1$) con producto p seguida por un período de inactividad, retomando luego la inyección del mismo producto p , pero en otro elemento ℓ . En la nueva formulación del problema, la inyección ℓ no conforma un nuevo “batch”, sino que se considera una porción adicional del lote ($\ell - 1$). De esta manera, puede acotarse el número de lotes requeridos por el plan de transporte. Un buen punto de partida para $|I^{new}|$ es: $|I^{new}| = \alpha |K|$, con $\alpha = 0,9$ para poliductos que operan en modo segregado, y $\alpha = 0,6$ para la operación en modo fungible o consolidado.

Las principales características de un lote son: (a) el producto y el volumen contenido, (b) la fuente o punto de ingreso donde se inyecta el combustible, y (c) las terminales de recepción destinatarias del envío y la cantidad de producto entregado. Si un nuevo lote ℓ inicia su recorrido durante la ejecución k , en alguna terminal intermedia s , tendrá que insertarse justo detrás del “batch” ($\ell - 1$). Para lograrlo, el modelo matemático deberá reservar el elemento ℓ en la interfase de los lotes ($\ell - 1$) y ($\ell + 1$). En otras palabras, ℓ se trasladará con dimensión nula desde el origen hasta la terminal de ingreso s , donde podrá ser impulsado al tiempo de inicio de la nueva ejecución k . La Figura V.5a ilustra la disposición inicial de lotes dentro del poliducto (“linefill”). La secuencia incluye dos “batches” nulos o vacíos, $B3$ y $B5$, que “fluyen” en la interfase de los lotes $B2$ - $B4$ y $B4$ - $B6$, en ese orden. Estas entidades, cuya inyección efectiva aún no se ha producido, fueron reservadas por el programador de la línea para introducir material en corridas posteriores desde la terminal intermedia de ingreso. En particular, el lote $B3$ ha alcanzado precisamente la coordenada de la terminal $s2$ al tiempo de inicio del programa.

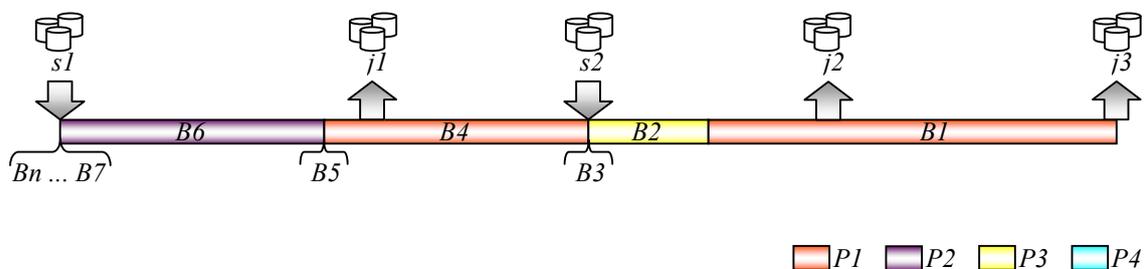


Figura V.5a. Posicionamiento de “Batches” Nulos ($B3$ y $B5$) a Inyectar en la Terminal Intermedias $s2$

Por su parte, la Figura V.5b ilustra el estado del sistema de transporte al tiempo de finalización de la primera corrida $K1$, esto es, luego de inyectar el lote $B3$ en la terminal $s2$. Como puede notarse, no existe actividad de bombeo en el tramo de tubería $s1-s2$ que comunica ambas fuentes de aprovisionamiento. No obstante, la inserción del lote $B3$ con producto $P4$ en la estación $s2$ moviliza los lotes $B2$ y $B1$ aguas abajo, induciendo la descarga de combustible $P3$ desde el lote $B2$ al destino $j2$, y de la especie $P1$ contenida en el lote $B1$ a las terminales $j2$ y $j3$.

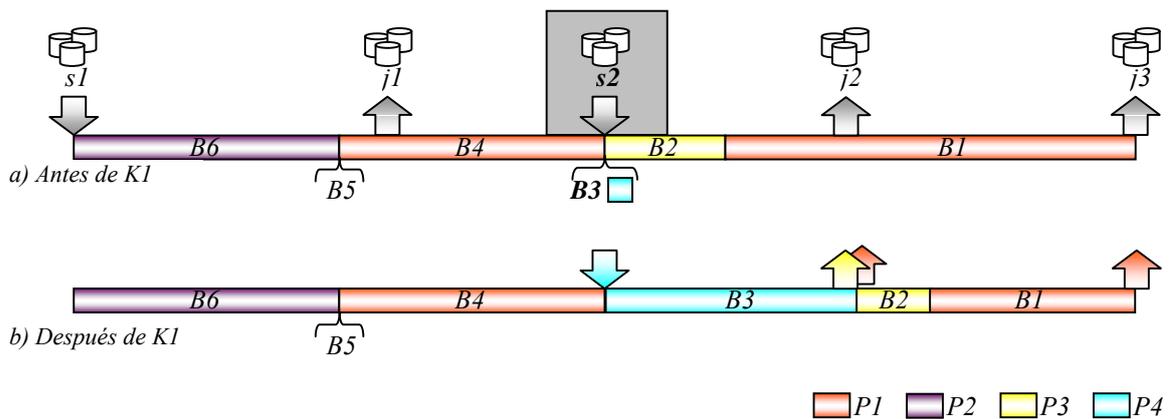


Figura V.5b. Despachos de Combustible Durante la Inyección del Lote $B3$ en la Estación Intermedia $s2$

V.3.3 Conjunto de Terminales de Ingreso y Recepción de Combustibles

Si bien algunas estaciones de almacenamiento a lo largo del poliducto pueden funcionar en modo dual, como terminales de recepción e inyección de combustibles, los conjuntos S y J solo involucran nodos “puros” de ingreso o egreso de material desde la tubería, respectivamente. Las granjas de tanques con doble propósito deberán modelarse como entidades compuestas por una fuente simple perteneciente al conjunto S , y un centro de recepción dentro del conjunto J , ambos elementos ubicados en la misma coordenada volumétrica del sistema de transporte. Los datos más relevantes vinculados a los nodos de ingreso de material son: (a) el conjunto de productos que pueden proveer, (b) las existencias de combustibles disponibles, contando el volumen adicional que arribará desde las refinерías que los abastecen en futuras corridas de producción, y (c) la coordenada volumétrica de localización de la terminal. En forma análoga, la información vinculada a cada una de las estaciones receptoras del poliducto incluye: (a’) el conjunto de combustibles demandados

a lo largo del horizonte de programación, (b') el nivel de stock de combustibles disponibles en tanques de la terminal, (c') los requerimientos de productos a ser atendidos antes de la finalización del horizonte, y (d') la localización de la terminal.

V.3.4 Conjunto de Combustibles o Productos Transportados

El conjunto P encierra a todas las especies de productos refinados que se transportan a través de la tubería desde las fuentes o puntos de ingreso de material hacia los destinos o nodos receptores del sistema, próximos a los grandes centros de demanda. En particular, P_j representa el subconjunto de combustibles requeridos por el centro de distribución $j \in J$, mientras P_s denota el grupo de productos que pueden abastecerse desde la terminal de ingreso $s \in S$, donde se concentra el material producido por diversas unidades de refino de la región de influencia.

V.4 Variables de Decisión

La formulación matemática del problema de programación de poliductos con múltiples puntos de ingreso incorpora tres grupos de variables binarias, que representan las siguientes decisiones:

- (a) La asignación del combustible p al lote i , $y_{i,p}$.
- (b) La selección del "batch" a inyectar $i \in I$ y el nodo de ingreso $s \in S$ donde se ejecuta la correspondiente corrida de bombeo (no ficticia) $k \in K$, $w_{i,s}^{(k)}$. Para cualquier corrida k , la variable $w_{i,s}^{(k)}$ indica el lote a inyectar y la fuente que lo abastece. Si el elemento i es un nuevo lote, y s una terminal intermedia, la condición $w_{i,s}^{(k)} = 1$ implica que el lote i (originalmente vacío), ubicado en la interfase de los envíos $(i - 1)$ e $(i + 1)$, se ha desplazado desde el origen del poliducto hasta la posición del nodo de ingreso s , antes de iniciar la nueva ejecución k . Por el contrario, si i es un lote preexistente que transita dentro de la línea, $w_{i,s}^{(k)} = 1$ indica que el "batch" i ha alcanzado (y no superado) la ubicación de la terminal s , y está en condiciones de incorporar un volumen adicional del mismo combustible que transporta, al momento de iniciar la nueva ejecución k .
- (c) La determinación de los destinos $j \in J$ que han de recibir combustible proveniente de alguno de los lotes en tránsito i , durante la corrida k ,

$x_{ij}^{(k)}$. La opción $x_{ij}^{(k)} = 1$ requiere que el lote i haya alcanzado la coordenada del destino j , al inicio o durante la propia ejecución k .

Por otro lado, el modelo incluye diversos grupos de variables continuas, tales como:

- (d) Los eventos de tiempo del problema, C_k , que representan los instantes de culminación de toda corrida de bombeo k .
- (e) La extensión de cada corrida k , L_k .
- (f) El volumen contenido por cada uno de los lotes i que transitan por el poliducto, en cada evento C_k , esto es $W_{i,k}$.
- (g) El volumen del nuevo lote i (o la fracción adicionada al lote en tránsito i) que se inyecta en la línea desde el nodo s durante la ejecución k , $Q_{i,s}^{(k)}$. En caso que el lote i provenga de alguna corrida previa $k' < k$, deberá haber alcanzado la ubicación del centro s ($w_{i,s}^{(k)} = 1$) al tiempo $[C_k - L_k]$, y el valor de la variable $Q_{i,s}^{(k)}$ medirá el volumen de producto adicional incorporado al lote i desde la fuente s durante la ejecución k .
- (h) La coordenada volumétrica superior de los “batches”, en cada evento de tiempo C_k . Esto es, el volumen contenido por la tubería entre el origen y el extremo más alejado del lote i , al culminar una nueva ejecución k , $F_{i,k}$.
- (i) El volumen de combustible transferido desde el lote i (en tránsito por el ducto) hacia la terminal de recepción j , durante la corrida de bombeo k : $D_{ij}^{(k)}$. Para que la variable $D_{ij}^{(k)}$ pueda tomar un valor positivo, el “batch” i deberá tener acceso al destino j durante la ejecución k , es decir, $x_{ij}^{(k)} = 1$.

Otras variables continuas, como $QP_{i,s,p}^{(k)}$ y $DP_{i,j,p}^{(k)}$, se incorporan a la formulación del problema para controlar el balance de volumen por combustible en cada terminal. Sin embargo, sus valores son determinados por las variables relacionadas $Q_{i,s}^{(k)}$ y $D_{ij}^{(k)}$, en caso que el producto p se haya asignado al lote i ($y_{i,p} = 1$).

V.5 Hipótesis del Modelo

La representación del transporte por tuberías con múltiples puntos de ingreso parte de suponer que:

- (1) Se trata de poliductos troncales o principales, que normalmente operan en flujo unidireccional.
- (2) En todo momento, el conducto permanece completamente lleno de combustibles líquidos incompresibles. La única forma de obtener una partida de producto desde la línea es mediante la inyección de un volumen equivalente de cualquier combustible, en alguna de las terminales de ingreso aguas arriba.
- (3) Los envíos de productos se movilizan dentro del sistema sin dispositivos físicos de separación. La condición de flujo turbulento permite asumir un perfil de velocidades plano (flujo pistón), reconociendo una pérdida de combustible por mezcla en las interfases.
- (4) La pérdida de combustible-mezcla o “transmix”, generada en la interfase de dos lotes consecutivos con productos distintos, es una constante que depende de las propiedades de las especies puestas en contacto, pero se asume independiente del caudal de transporte y del trayecto recorrido.
- (5) El caudal de inyección de material está acotado a un cierto rango de valores posibles $[vb_{\min,s}; vb_{\max,s}]$, que puede variar de una fuente a la otra.
- (6) Las corridas de impulsión se ejecutan de a una por vez. En consecuencia, una única estación de ingreso puede estar inyectando producto en la tubería en un dado instante.
- (7) Los requerimientos de combustible en cada destino deben satisfacerse antes de la finalización del horizonte, y constituyen datos determinísticos obtenidos a partir de las órdenes o nominaciones colocadas por los usuarios.
- (8) Los niveles de stock en tanques de las terminales de recepción y el contenido del poliducto al tiempo $t = 0$, se conocen al abordar el plan.
- (9) El volumen disponible de cada producto en las estaciones de ingreso, provisto por las refinerías, constituye un dato del problema.

Pese a inducir valores aproximados en el cálculo de las pérdidas por interfases, la Hipótesis (4) permite obtener una estimación razonable del costo de reprocesamiento del material degradado. La contribución del término de interfases a la función objetivo del problema se basa en aproximaciones, cuyos valores se ajustan al patrón normal de tamaños de interfases entre pares de

combustibles puestos en contacto. De esta manera, se insta a generar menos transiciones en la secuencia de transporte, favoreciendo la generación de interfases entre combustibles con alto grado de compatibilidad. En la fase posterior de optimización operativa de las bombas, con muchas de las decisiones de planeación adoptadas, pueden computarse valores más exactos para el volumen de producto degradado. Por otra parte, la Hipótesis (6) debería relajarse en caso de contemplar la ejecución simultánea de múltiples ingresos, tal como sucede en diversas redes integradas de transporte por poliductos. Esta característica será estudiada en detalle en el siguiente capítulo de esta tesis.

V.6 Formulación Matemática del Problema

V.6.1 Restricciones

La formulación matemática del problema de programación de poliductos con múltiples ingresos se ha estructurado en torno a cuatro bloques de ecuaciones. El primero de ellos involucra las restricciones de control de la secuencia de ejecuciones, que definen el tamaño, el contenido y los tiempos de inyección de los lotes en cada corrida de bombeo. Un segundo módulo de restricciones está destinado al seguimiento de los lotes dentro del conducto para monitorear los cambios en el tamaño y la ubicación de cada envío en el tiempo. El tercer bloque plantea las condiciones de viabilidad para la inyección o descarga de productos, asegurando que los lotes en tránsito se encuentran en la posición correcta para recibir o entregar material desde la línea a cualquiera de las terminales del sistema, ya sean fuentes o refinerías intermedias, o centros de recepción de combustibles. Finalmente, el último grupo de ecuaciones garantiza que los inventarios disponibles en tanques de los depósitos se mantienen dentro del rango de valores posibles, y las demandas en los destinos se satisfacen a término.

V.6.1.a Restricciones de Control de Ejecuciones

Secuencia de Ejecuciones. Toda corrida de bombeo $k \in K$ debe iniciarse recién después de haber completado la ejecución predecesora $(k - 1)$, según lo establece el propio orden cronológico del conjunto K . Sea C_k el tiempo de finalización de la corrida k , y L_k su duración, luego,

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall k \in K (k > 1) \quad (\text{V.1})$$

Por simplicidad, los tiempos de transición entre ejecuciones consecutivas se han omitido. No obstante, estos parámetros pueden incorporarse de un modo sencillo, análogo al presentado en los capítulos precedentes. En principio, la cardinalidad del conjunto K debe adoptarse en forma arbitraria, aunque su valor debe ser tan grande como el número de ejecuciones requeridas por el programa óptimo de bombeo. Si h_{\max} representa la duración global del horizonte, los tiempos de culminación de todas las corridas no podrán exceder este valor.

$$C_k \leq h_{\max} \quad \forall k \in K \quad (\text{V.2})$$

Asignación de Corridas de Bombeo a Lotes y Terminales de Ingreso. A partir de la Hipótesis (6), cada corrida de bombeo k puede estar asociada a la inyección de un lote de combustible desde una única fuente $s \in S$. El objetivo puede ser introducir un nuevo lote $i \in I^{new}$ en la línea, o aportar un volumen adicional al lote existente $i \in I$, en tránsito por la tubería. Definamos la variable binaria $w_{i,s}^{(k)}$ para denotar que se planea inyectar el nuevo lote $i \in I^{new}$ (o un volumen adicional al lote en tránsito $i \in I$) a través de la corrida k desde el nodo s , siempre que $w_{i,s}^{(k)} = 1$. Por consiguiente,

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (\text{V.3})$$

Dicho de otro modo, existe sólo una fuente de ingreso y un único lote de combustible vinculados con cada ejecución. En aquel caso en que la corrida $k^\#$ no sea requerida por el programa de transporte óptimo, se denominará “ficticia”, y todas las variables $w_{i,s}^{(k^\#)}$ se tornarán nulas.

Dimensionamiento de las Inyecciones. Sea $Q_{i,s}^{(k)}$ la variable continua que representa el tamaño del lote i , o la porción del “batch” i introducida en la línea desde la terminal de ingreso s , durante la ejecución k . Como ya sea ha dicho, el lote i puede ser un nuevo lote, o un “batch” de combustible en tránsito por el poliducto, que incorpora una nueva partida del mismo producto desde el nodo s . $Q_{i,s}^{(k)}$ tomará valor positivo sólo si la corrida k realmente se ejecuta, e introduce el nuevo lote i (o una nueva fracción adicional a i) haciendo $w_{i,s}^{(k)} = 1$. Por lo tanto,

$$Q_{\min} w_{i,s}^{(k)} \leq Q_{i,s}^{(k)} \leq Q_{\max} w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (\text{V.4})$$

Los parámetros (Q_{\min}, Q_{\max}) representan los tamaños mínimo y máximo admisibles, que acotan el volumen a impulsar en el poliducto durante una nueva ejecución. Es importante reconocer el volumen total de producto introducido en la tubería desde la fuente s durante la corrida k , que estará dado por: $\sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)}$.

Duración de las Ejecuciones. Sea $L_{k,s}$ la duración de la corrida de bombeo k ejecutada en la fuente o terminal de ingreso s . Luego,

$$vb_{\min,s} L_{k,s} \leq \sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)} \leq vb_{\max,s} L_{k,s} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (V.5)$$

En esta expresión, debe tenerse en cuenta que: $L_k = \sum_{s \in S} L_{k,s}$. Por su parte, el intervalo $[vb_{\min,s}; vb_{\max,s}]$ representa el rango de caudales posibles para la inyección de combustibles en la terminal s . En consecuencia, para toda corrida ficticia k que no se ejecuta en el programa de bombeo óptimo, deberá verificarse $L_k = 0$, y $\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)} = 0$.

V.6.1.b Restricciones de Seguimiento de Lotes

Monitoreo del Tamaño de los Envíos. Sea $W_{i,k}$ el tamaño del lote i en el instante de finalización de la corrida de bombeo k , es decir, a tiempo C_k . En el transcurso de la ejecución k , el volumen del lote i podría modificarse por dos razones: (a) el aporte de material inyectado desde alguna fuente intermedia s , o (b) la transferencia de combustible desde el propio lote hacia alguno de los centros de distribución $j \in J$. En el primer caso, su tamaño se incrementa, mientras que en el segundo, se reduce.

$$W_{i,k} = W_{i,k-1} + \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (V.6)$$

Cuando el “batch” i es un nuevo lote introducido en la línea a través de la corrida k , el valor de la variable $W_{i,k-1}$ será inexorablemente cero. Caso contrario, $W_{i,k-1}$ representará el volumen del lote i al culminar la corrida previa $(k - 1)$. Si el envío i proviene de un horizonte anterior, y reside en el conducto al tiempo $t = 0$, se cumplirá $W_{i,k-1} = W_i^o$ para $k = 1$, donde W_i^o denota el contenido del “batch” i en el tren inicial de envíos.

Seguimiento de la Posición de los Lotes en el Tiempo. Sea $F_{i,k}$ la coordenada volumétrica superior del “batch” i al tiempo de finalización de la corrida k ($t = C_k$). En otras palabras, la variable no negativa $F_{i,k}$ engloba el volumen total contenido entre el origen (primer punto de ingreso de combustibles al sistema) y la sección extrema superior del lote i , luego de completarse la ejecución k . En forma análoga, $F_{i+1,k}$ representa la coordenada superior del lote ($i + 1$), que marcha solidariamente detrás del envío i en el mismo instante C_k . Por la condición de continuidad del flujo dentro de la línea (Hipótesis (2)), la variable $F_{i+1,k}$ puede también interpretarse como la coordenada inferior del “batch” i , esto es, el volumen contenido entre el origen del sistema y la sección extrema inferior del lote i , al tiempo C_k . Luego,

$$F_{i,k} - W_{i,k} = F_{i+1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (V.7)$$

Dada la condición de flujo unidireccional, todo lote que transita por la tubería sólo puede moverse aguas abajo del sistema, en caso que el tramo se active (ver Figura V.6). Por ende, la coordenada superior de un “batch” i a los tiempos de culminación de dos corridas consecutivas ($k - 1$) y k deberá ajustarse a la siguiente restricción,

$$F_{i,k-1} \leq F_{i,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (V.8)$$

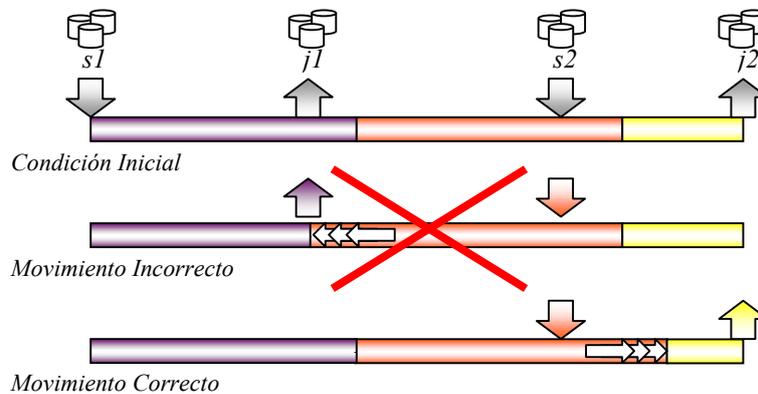


Figura V.6. Condición de Flujo Unidireccional de los Envíos

Teniendo en cuenta la ubicación de las terminales de ingreso y egreso de lotes, no existe la posibilidad de entregar material a un centro de recepción j si la corrida de bombeo inyecta combustible desde una terminal s aguas abajo del destino señalado ($\sigma_j < \tau_s$). Por lo tanto,

$$D_{i,j}^{(k)} \leq \sum_{\substack{s \in S \\ \tau_s < \sigma_j}} \sum_{i' \in I} Q_{i',s}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (\text{V.9})$$

Es importante notar que el lado derecho de la Ecuación (V.9) limita el tamaño de las derivaciones ($D_{i,j}^{(k)}$) al volumen inyectado en cualquier lote i' (igual o distinto a i), pero sólo desde terminales del sistema ubicadas aguas arriba del destino j ($\tau_s < \sigma_j$). Dicho de otro modo, si $\sigma_j < \tau_s$, donde s es la terminal de ingreso activa durante la ejecución k , entonces $D_{i,j}^{(k)} = 0$.

Por otro lado, si el parámetro PV representa el contenido total del poliducto, desde el origen hasta la terminal más alejada, la coordenada superior de cada lote i que transita por la tubería nunca podrá superar el valor de PV .

$$F_{i,k} \leq PV \quad \forall i \in I, k \in K \quad (\text{V.10})$$

Asimismo, la coordenada inferior de cualquier lote en tránsito i tendrá que cumplir con la condición de no-negatividad. En otras palabras, el extremo anterior del envío deberá permanecer aguas abajo del nodo de origen, o a lo sumo en el mismo origen del poliducto.

$$F_{i,k} - W_{i,k} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (\text{V.11})$$

Balance Volumétrico Alrededor del Poliducto. Tal como se ha expresado, una tubería troncal para el transporte de combustibles refinados permanece completamente llena de productos en todo momento. Por consiguiente, el contenido total de los lotes que fluyen por la línea debe igualar el valor de PV , en el instante de finalización de toda ejecución k del plan de bombeo.

$$\sum_{i \in I} W_{i,k} = PV \quad \forall k \in K \quad (\text{V.12})$$

Basándose en el supuesto de incompresibilidad de los líquidos a presiones de trabajo normales, el volumen total de combustibles transferido desde los lotes en tránsito por el poliducto hacia los tanques de las terminales receptoras debe coincidir con el tamaño de la inyección impulsada desde alguna fuente aguas arriba del sistema, durante una ejecución k . En términos matemáticos,

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (\text{V.13})$$

De acuerdo con las Ecuaciones (V.3) y (V.4), a lo sumo uno de los términos $Q_{i,s}^{(k)}$ en el lado izquierdo de la Restricción (V.13) puede adoptar valor positivo en cada corrida de bombeo k .

V.6.1.c Condiciones de Conectividad entre Terminales y Lotes

Cada vez que se ejecuta una nueva corrida de inyección k en una terminal de ingreso s , la formulación del problema supone que el material inyectado es transferido a un lote i (originalmente vacío o en tránsito) al cual se tiene acceso. El valor de la variable $W_{i,k-1}$, que representa el tamaño del “batch” i al inicio de la nueva corrida k , puede ser cero (si i es un nuevo envío) o positivo (si i ha sido inyectado previamente en una terminal de ingreso aguas arriba).

Abastecimiento de Material a un Lote Preexistente. Para que un lote i pueda recibir material desde alguna fuente s durante la corrida de inyección k , deben cumplirse las siguientes condiciones:

- (a) Antes de comenzar la ejecución k , el “batch” i deberá haber alcanzado la localización de la terminal de ingreso s (τ_s). En otros términos, la coordenada superior del lote i al iniciar la nueva ejecución ($F_{i,k-1}$) no podrá ser inferior que el parámetro τ_s .

$$F_{i,k-1} \geq \tau_s w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (V.14)$$

- (b) Al momento de iniciar la nueva corrida k , la coordenada inferior del lote i ($F_{i,k-1} - W_{i,k-1}$) no deberá haber sobrepasado la ubicación del nodo s (τ_s). En efecto, si el nodo s inyecta combustible dentro del lote i durante la corrida k , la diferencia ($F_{i,k-1} - W_{i,k-1}$) no podrá superar el valor de τ_s .

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \tau_s + (PV - \tau_s) (1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (V.15)$$

De las Ecuaciones (V.14) y (V.15) se desprende que $F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \tau_s \leq F_{i,k-1}$ siempre que $w_{i,s}^{(k)} = 1$ y un cierto volumen de material sea abastecido por el centro s al “batch” i , en tránsito por el conducto. En caso que el lote receptor i sea un nuevo envío, se verifica que $W_{i,k-1} = 0$ y en consecuencia, ambas restricciones conducen a $F_{i,k-1} \leq \tau_s \leq F_{i,k-1}$, es decir, $\tau_s = F_{i,k-1}$. Para reducir el costo computacional del procedimiento solución, se

puede permitir una pequeña tolerancia $\varepsilon > 0$, y la condición de accesibilidad de la terminal al “batch” se convierte en: $F_{i,k-1} - \varepsilon \leq \tau_s \leq F_{i,k-1} + \varepsilon$.

La Figura V.7 ilustra la disposición de lotes dentro de la tubería, antes de iniciar una nueva ejecución. Supongamos que pueden impulsarse combustibles desde cualquiera de las fuentes $s1$ (en el origen) o $s2$ (intermedia). A partir de la ubicación de los envíos, se presentan tres alternativas posibles: (a) introducir el nuevo lote $B4$ en el nodo de ingreso $s1$, (b) agregar combustible $P2$ al lote preexistente $B3$ desde la terminal $s1$, o (c) inyectar más producto $P1$ desde la estación intermedia $s2$ al lote en tránsito $B2$.

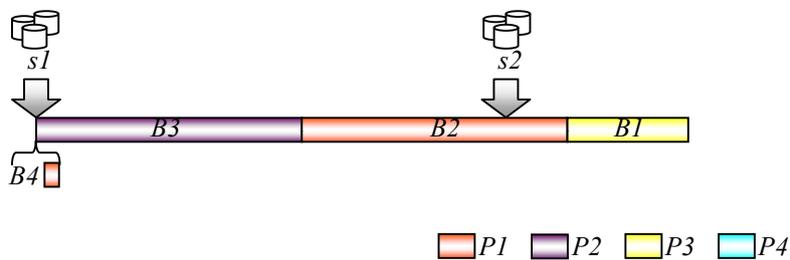


Figura V.7. Posibles Inyecciones de Combustibles a “Batches” Preexistentes

Por su parte, la Figura V.8 representa dos alternativas de operación para el ingreso de combustibles en la terminal intermedia $s2$. La secuencia inicial de lotes se describe en el diagrama superior de la Figura V.8.A. En la siguiente línea del mismo esquema, un nuevo envío $B6$ con combustible $P1$ se introduce en el origen de la tubería (fuente $s1$), hasta que la coordenada superior del lote $B5$ alcanza la ubicación de la terminal intermedia $s2$. Cuando este evento ocurre, se interrumpe el bombeo del “batch” $B6$ en $s1$ y de inmediato, la terminal $s2$ comienza a impulsar producto $P4$ dentro del lote $B5$ (ver última línea de la Figura V.8.A). A diferencia de la alternativa anterior, la Figura V.8.B incluye un “batch” vacío $B3$, que transita en la interfase de los lotes $B4$ y $B2$. Como antes, un nuevo “batch” $B6$ con combustible $P1$ se introduce en el origen $s1$. Pero en este caso, la corrida de inyección se detiene en el instante en que el lote vacío $B3$ (interfase $B4$ - $B2$) alcanza la posición del nodo $s2$. La siguiente operación de bombeo se ejecuta en la propia terminal $s2$, para introducir un nuevo lote de combustible $P4$, el “batch” $B3$, que transita entre los envíos $B4$ y $B2$ (ver última línea de la Figura V.8.B).

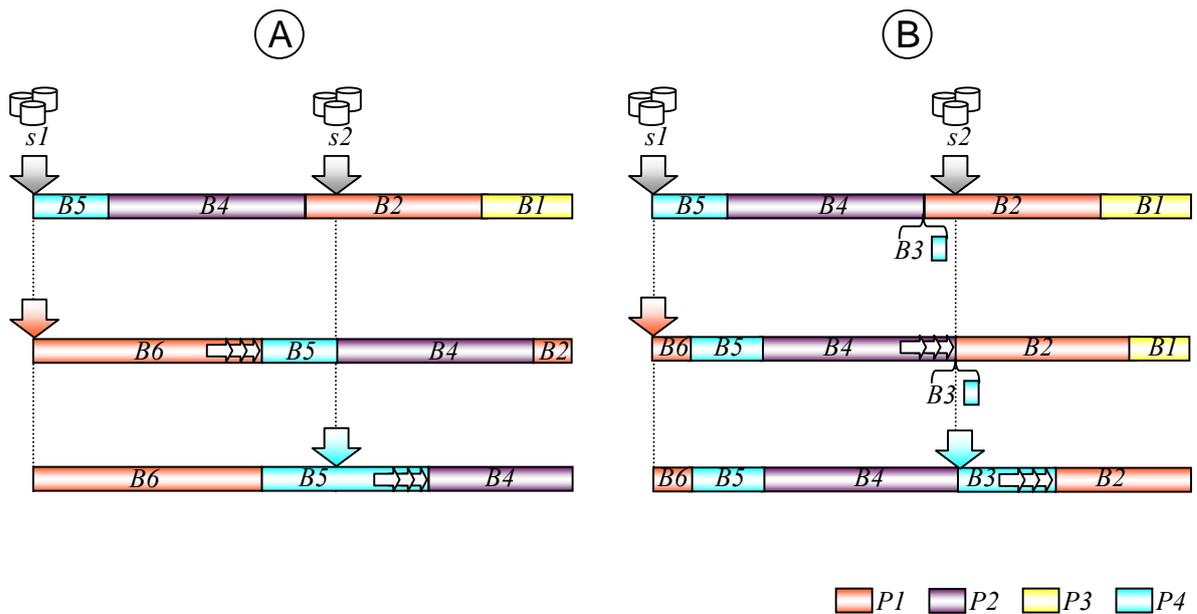


Figura V.8. Alternativas para el Transporte de Combustible P4 desde la Terminal Intermedia s2

Estas circunstancias ponen de relieve una de las tantas situaciones de compromiso que deberán resolverse a través del programa matemático. *El adelantamiento en el transporte de combustible P4 (alternativa B) provoca la generación de dos nuevas mezclas o interfases: $(P1_{B2} - P4_{B3})$ y $(P4_{B3} - P2_{B4})$. La pregunta es: ¿vale la pena pagar el alto precio de la degradación de los combustibles para anticipar el envío de P4 a terminales aguas abajo? ¿No convendría aguardar el arribo del “batch” B5 y efectuar el traslado en forma consolidada, a pesar de la demora que ello implica?* La respuesta estará en la evaluación económica de ambas alternativas, expresada en términos de la función objetivo del programa.

Transferencia de Material desde los Lotes en Tránsito. La derivación del combustible contenido en el “batch” $i \in I$ hacia el centro de recepción $j \in J$ durante la ejecución $k \in K$ solo es practicable en la medida que el propio envío i haya alcanzado la conexión física entre el polducto y el destino j . El cumplimiento de tal condición implica que:

- (a) La coordenada volumétrica superior del “batch” i , al finalizar la corrida de bombeo k ($F_{i,k}$), no debe ser inferior a la ubicación del j -ésimo depósito (σ_j), de modo que $F_{i,k} \geq \sigma_j$.

- (b) La coordenada inferior del lote i , al culminar la ejecución previa $(k - 1)$, debe transitar aguas arriba del centro receptor j , i.e. $F_{i,k-1} - W_{i,k-1} < \sigma_j$.

Sea $x_{i,j}^{(k)}$ la variable binaria que denota la accesibilidad y transferencia de una fracción del lote i a los tanques de la terminal j durante una nueva ejecución k , toda vez que $x_{i,j}^{(k)} = 1$. Por el contrario, si $x_{i,j}^{(k)} = 0$, no existe transferencia de material desde el “batch” i al destino j , al menos durante la corrida de bombeo k ($D_{i,j}^{(k)} = 0$). Corresponde aclarar que $x_{i,j}^{(k)}$ se iguala a cero ya sea porque no hay accesibilidad a tanques de la terminal j desde el lote i , o porque, a pesar de que la transferencia de material es factible, ésta no se realiza durante la ejecución k . En términos matemáticos,

$$D_{\min} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq D_{\max} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (V.16)$$

donde D_{\max} es una cota superior impuesta sobre el volumen de combustible que puede transferirse desde cualquier lote en tránsito por el poliducto, a un centro de recepción del sistema. Asimismo, las Restricciones (V.17) y (V.18) modelan las condiciones de accesibilidad expresadas en (a) y (b), a los efectos de corroborar la factibilidad de las derivaciones.

$$F_{i,k} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (V.17)$$

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \sigma_j + (PV - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (V.18)$$

Aunque algunas operaciones de “corte” o “stripping” del “batch” i hacia la terminal j sean factibles, podría ocurrir que dicho envío esté destinado a otros depósitos. En tales circunstancias, la variable $x_{i,j}^{(k)}$ también se anula.

Si la corrida de bombeo k inyecta un nuevo lote i' al sistema, y las coordenadas de localización de otro “batch” en tránsito $i < i'$ ($F_{i,k-1}$, $F_{i,k}$) al finalizar las ejecuciones sucesivas $(k - 1)$ y k , satisfacen la siguiente condición: $F_{i,k-1} - W_{i,k-1} < \sigma_j \leq F_{i,k}$, entonces es posible acotar el volumen de combustible entregado desde el “batch” i a la terminal de recepción j durante la corrida k a un tope de: $[\sigma_j - (F_{i,k-1} - W_{i,k-1})]$ unidades. Este límite coincide con el valor obtenido en la Ecuación (IV.18) del capítulo previo, dedicado a sistemas con múltiples salidas y un único punto de ingreso de combustibles. Sin embargo, una situación un tanto distinta podría presentarse en el caso que la corrida de bombeo k introdujese material adicional al propio lote i desde la fuente s ($Q_{i,s}^{(k)} > 0$), y una porción del mismo lote i se derivase, en forma simultánea, a

destinos sucesivos. Como resultado, el máximo volumen de producto que puede “cortarse” desde el “batch” i a las terminales aguas abajo del punto de inyección s , incluido el nodo de egreso j , durante la corrida k está dado por,

$$\sum_{j'=1}^j D_{i,j'}^{(k)} \leq \sigma_j - (F_{i,k-1} - W_{i,k-1}) + \sum_{\tau_s < \sigma_j} Q_{i,s}^{(k)} + (PV - \sigma_j) (1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad (V.19)$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K$$

Partiendo de la disposición inicial de envíos que se presenta en la primera línea de la Figura V.9, pueden ejecutarse dos operaciones de impulsión alternativas: (A) la inserción del nuevo lote $B3$ en la estación cabecera $s1$, o (B) la incorporación de combustible adicional al “batch” preexistente $B1$, desde la terminal intermedia $s2$. En la Figura V.9.A se ilustra la máxima porción del lote $B1$ que puede abastecerse al destino $j1$ durante la impulsión del nuevo “batch” $B3$, imponiendo una cota superior para $D_{B1,j1}^{(k)}$ dada por la Ecuación (V.19). La otra operación de bombeo posible se ilustra en la segunda línea de la Figura V.9.B. En este último caso, el límite de transferencia para $D_{B1,j1}^{(k)}$ se relaja en $Q_{B1,s2}^{(k)}$ unidades. Precisamente, a partir de la ecuación de balance (V.13), el tope sobre $D_{B1,j1}^{(k)}$ será establecido por la misma variable $Q_{B1,s2}^{(k)}$ (volumen total inyectado en la ejecución k).

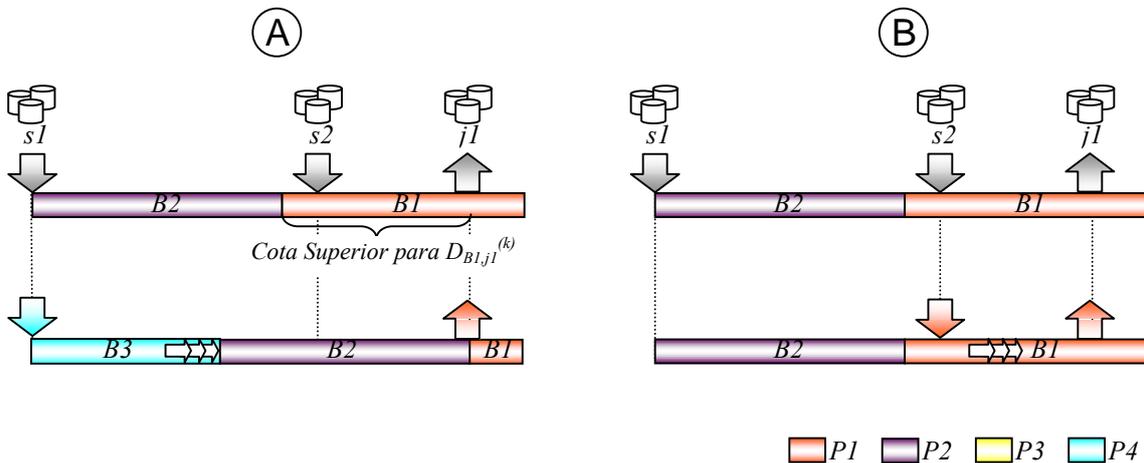


Figura V.9. Límite en el Volumen de Producto que Puede Abastecerse a las Terminales, a partir de la Ecuación (V.19)

V.6.1.d Restricciones de Aprovisionamiento y Demanda de Productos

Asignación de Productos a “Batches”. Sabido es que cada envío de combustible puede contener, como máximo, una única especie. La misma

variable binaria $y_{i,p}$ utilizada en capítulos previos será la encargada de indicar que el lote i contiene producto p , en cuyo caso se cumple $y_{i,p} = 1$. Luego,

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (\text{V.20})$$

Cuando un lote predefinido i no se asigna al transporte de ningún tipo de combustible p en el programa óptimo de bombeo ($y_{i,p} = 0 \quad \forall p \in P$), el elemento nunca será introducido en la línea. En otras palabras, la condición $\sum_p y_{i,p} = 0$ implica que no existe corrida k ejecutada en ninguna de las terminales de ingreso s que aporte material al envío i dentro del poliducto. Por consiguiente, el “batch” i es una entidad ficticia, para la cual se verifica que $\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} w_{i,s}^{(k)} = 0$. Por el contrario, si la especie p efectivamente se asocia al envío i , entonces deberá ejecutarse al menos una corrida de bombeo k que induzca la impulsión del “batch” i dentro de la línea, para iniciar el transporte de p a través del conducto. Ambas condiciones pueden expresarse matemáticamente del modo que sigue,

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} w_{i,s}^{(k)} \leq |K| \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (\text{V.21})$$

Para reducir el tamaño de la región factible del problema, sin perjuicio de excluir la solución óptima, los lotes ficticios se relegan a las últimas posiciones de la secuencia de envíos propuestos, a través de la siguiente restricción,

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (i > 1) \quad (\text{V.22})$$

Cantidad de Producto p Inyectado en la Línea a través de la Corrida k . En caso que $y_{i,p} = 0$, la cantidad de combustible p que pueda inyectarse dentro del lote i desde cualquiera de las fuentes s a través de una nueva ejecución k siempre será nula. Por el contrario, si $y_{i,p} = 1$ el volumen de producto p impulsado en la línea estará dado por la misma variable continua $Q_{i,s}^{(k)}$, es decir, la cantidad de combustible introducido en el lote i supuesto que la nueva ejecución k se desarrolla en la refinería o punto de ingreso s . Ambos requisitos quedan establecidos a través de las Ecuaciones (V.23) y (V.24).

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} Q_{i,s}^{(k)} \leq Q_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P \quad (\text{V.23})$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i,s,p}^{(k)} = Q_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (\text{V.24})$$

El parámetro $Q_{\max,p}$ fija un tamaño máximo admisible para las inyecciones de combustible p dentro de la tubería.

Volumen de Producto p Transferido desde la Línea a los Depósitos.

No existe la posibilidad de entregar combustible p desde el “batch” en tránsito i a la terminal receptora j durante la ejecución k , si el envío i no contiene producto p . Sólo cuando $y_{i,p} = 1$, el volumen de combustible p abastecido desde el lote i al depósito j durante la corrida k estará dado por el valor de la propia variable $D_{i,j}^{(k)}$. Estas dos circunstancias se contemplan en las Restricciones (V.25) y (V.26), respectivamente.

$$\sum_{k \in K} DP_{i,j,p}^{(k)} \leq D_{\max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P \quad (\text{V.25})$$

$$\sum_{p \in P} DP_{i,j,p}^{(k)} = D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (\text{V.26})$$

Suministro de Combustible p desde el Nodo-Fuente s . Supongamos que $SU_{p,s}$ representa el volumen total de producto p disponible en la terminal de ingreso s , a lo largo de todo el horizonte de planeación. Por su parte, el parámetro $SL_{p,s}$ impone una cota inferior a la cantidad de combustible p que *debe* introducirse en la tubería desde la fuente s durante el nuevo horizonte. En términos matemáticos,

$$SL_{p,s} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} QP_{i,s,p}^{(k)} \leq SU_{p,s} \quad \forall p \in P, s \in S \quad (\text{V.27})$$

Por lo general, $SL_{p,s}$ es un volumen suficiente para satisfacer, en conjunto con otras fuentes de suministro, las demandas preestablecidas de combustible p en terminales receptoras que no pueden ser cubiertas con el inventario inicial disponible dentro de la tubería. Sin embargo, en algunos casos este valor es aún mayor. Los objetivos normalmente perseguidos podrían ser dos: (i) obtener una disposición final de envíos apropiada, acorde a los requerimientos de horizontes futuros, o (ii) liberar capacidad de almacenamiento en el nodo s para posibilitar el arribo de nuevas partidas de combustibles refinados provenientes de las destilerías que lo abastecen.

Cumplimiento de las Demandas en cada Centro de Recepción. Sea $DL_{p,j}$ la demanda mínima de combustible p que debe ser abastecida al destino j

antes de la finalización del nuevo horizonte. Además, como la capacidad de los tanques de almacenamiento en las terminales de recepción es limitada, el volumen total de producto p transferido desde el poliducto hacia el depósito j a lo largo del horizonte debe acotarse a un valor máximo. Para ello, se introduce un nuevo parámetro $DU_{p,j}$ que determina la cantidad máxima de cada especie p que puede ser recibida y almacenada en tanques de la estación j . Luego, el volumen total de combustible derivado al destino j desde todos los “batches” que transportan producto p se restringe a,

$$DL_{p,j} - B_{p,j} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} DP_{i,j,p}^{(k)} \leq DU_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J \quad (V.28)$$

Cuando no todas las solicitudes de combustible p en el destino j puedan abastecerse antes de la culminación del horizonte actual, aparecerá un valor positivo de incumplimiento o “backorder” $B_{p,j} > 0$, que deberá cubrirse con nuevos despachos, en futuras instancias del plan. La incorporación de la variable continua $B_{p,j}$ en la Ecuación (V.28) permite obtener soluciones factibles para el programa de operaciones del poliducto, aun cuando algunas órdenes de transporte queden insatisfechas. No obstante, el costo en el que se incurre suele ser significativamente alto.

Disposición Inicial de Envíos. Sea W_i^o el volumen contenido por un dado lote $i \in I^{old}$ proveniente del horizonte previo que permanece dentro de la tubería al iniciar el nuevo plan. En el instante $t = 0$, la coordenada superior del lote $i \in I^{old}$ puede obtenerse fácilmente, sumando el volumen W_i^o de todos los “batches” $i' \in I^{old}$ que suceden al lote i , más el propio volumen del envío i . Esto es,

$$F_{i,k-1} = \sum_{\substack{i' \geq i \\ i' \in I^{old}}} W_{i'}^o \quad \forall i \in I^{old}, k = 1 \quad (V.29)$$

Asimismo, se conoce el producto P_i que transporta cada envío impulsado en el horizonte previo ($i \in I^{old}$) y residente en la tubería a $t = 0$, de modo que,

$$y_{i,p} = 1 \quad \forall i \in I^{old}, p = P_i \quad (V.30)$$

V.6.2 Función Objetivo del Problema

El objetivo principal del problema consiste en determinar un programa de bombeo y distribución que minimice la suma total de costos operativos del transporte por tuberías, que involucran: (i) el costo imputable a la inactividad

del poliducto (UC), (ii) los costos de transición y reprocesamiento del material de interfase entre lotes consecutivos de combustibles p y p' ($cif_{p,p'}$), (iii) el costo de la energía que consumen las bombas para movilizar los “batches”, y (iv) los costos atribuibles al incumplimiento de las demandas.

En primer término, es posible determinar la suma de tiempos en los que algún tramo de la línea permanece activo, a partir de la ejecución de las corridas de bombeo planeadas. Naturalmente, su valor resulta del cálculo de $\sum_k L_k$. Si h_{\max} comprende la totalidad de horas incluidas en el horizonte actual, y ρ es el índice de penalización por hora de inactividad, el costo imputable a los “tiempos muertos” del programa de operaciones viene dado por,

$$UC = \rho (h_{\max} - \sum_{k \in K} L_k) \quad (V.31)$$

Por otra parte, se asume que el costo de reprocesamiento del material de interfase entre envíos consecutivos de combustibles p y p' es un dato conocido del problema ($cif_{p,p'}$), el cual no depende del caudal de traslado de los “batches” ni de la distancia recorrida. Por lo tanto, tendrá que contemplarse una pérdida económica mínima de $cif_{p,p'}$ unidades asociada a la degradación del producto contenido en cada envío i , siempre que el lote i se asigne a la especie p y sea sucedido por otro lote ($i + 1$) que transporte producto p' .

$$TC_i \geq cif_{p,p'} (y_{i,p} + y_{i+1,p'} - 1) \quad \forall i \in I, (p \neq p') \in P \quad (V.32)$$

Continuando con el análisis de los términos de la función objetivo del problema, es el turno de uno de los componentes críticos: el costo de bombeo. Sea $cin_{p,s}$ el parámetro que representa el costo promedio de inyección y transporte de cada unidad de producto p introducida en la fuente s , y destinada a las distintas terminales de recepción que demandan combustible p ($j \in J_{s,p} \subseteq J_p$). En consecuencia, los costos de la energía que insume la operación de las bombas en cada ejecución k vienen dados por,

$$PC_k = \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} cin_{p,s} QP_{i,s,p}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (V.33)$$

Para el cálculo del costo aproximado de inyección $cin_{p,s}$ es necesario obtener los coeficientes de peso $\eta_{p,s,j}$, de modo de estimar cómo se distribuye una unidad de producto p inyectada en el nodo s entre todas las terminales receptoras, aguas abajo del punto de ingreso. Expresado en términos matemáticos: $\eta_{p,s,j} = DL_{p,j} / (\sum_{j' \in J_{s,p}} DL_{p,j'}) \quad \forall p \in P, s \in S, j \in J_{s,p}$. De esta forma, los términos individuales correspondientes a cada destino componen el costo

aproximado de inyección de una unidad de producto p en el nodo s . Su valor resulta del promedio ponderado $cin_{p,s} = \sum_{j \in Js,p} \eta_{p,s,j} cin_{p,s,j}$. En esta última expresión, $cin_{p,s,j}$ representa el costo unitario de traslado del combustible p desde el nodo s al destino j a través de la tubería.

Finalmente, los costos atribuibles al incumplimiento en la atención de las demandas (BC) se consideran proporcionales al volumen de combustible insatisfecho al finalizar el horizonte de programación. Si $cb_{p,j}$ representa el costo de retrasar el abastecimiento de una unidad de combustible p al destino j , se deduce que,

$$BC = \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} cb_{p,j} B_{p,j} \quad (V.34)$$

En síntesis, el objetivo global del problema estará dado por,

$$Min \quad z = UC + \sum_{i \in I} TC_i + \sum_{k \in K} PC_k + BC \quad (V.35)$$

que es equivalente a expresar,

$$Min \quad z = \rho(h_{\max} - \sum_{k \in K} L_k) + \sum_{i \in I} TC_i + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} cin_{p,s} QP_{i,s,p}^{(k)} + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} cb_{p,j} B_{p,j} \quad (V.36)$$

V.7 Aplicación del Modelo a Distintas Variantes de un Caso de Estudio

La formulación matemática propuesta para la programación del transporte por poliductos con múltiples ingresos fue aplicada a una tubería principal que involucra dos puntos de inyección y tres terminales receptoras. El caso fue introducido por P. Jittamai en su tesis doctoral del año 2004 (Universidad de Texas A&M, EE.UU.) y consiste en una línea de transmisión con flujo unidireccional, compuesta por cuatro tramos, cada uno de los cuales contiene 20 unidades de volumen (ver Figura V.10). El primer tramo conecta el nodo 1, ubicado en el origen del sistema (fuente de ingreso $S1$) con el nodo 2 (depósito de recepción $D1$). El segundo segmento une esta última terminal de tanques con la estación de inyección intermedia $S2$, representada en la red como el nodo 3. Los dos últimos tramos abastecen de combustibles a los nodos más distantes, 4 y 5. En resumen, la capacidad total del poliducto suma 80 unidades.

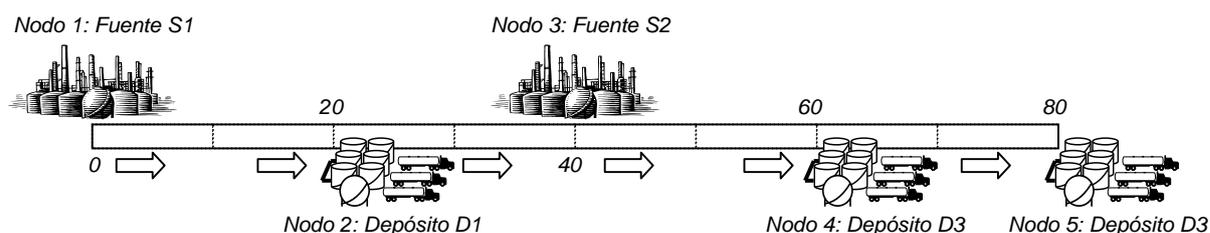


Figura V.10. Ejemplo de Aplicación con Dos Terminales de Ingreso y Tres Puntos de Recepción a lo Largo del Poliducto

La tubería transporta tres tipos de combustibles líquidos denominados A, B y C, los cuales son provistos por las refineras S1 y S2 para atender las demandas de los destinos D1, D2 y D3, antes de la finalización del plan de operaciones. En los primeros ejemplos, la longitud del horizonte abarca 5 días (120 horas), y el caudal de transporte en cada uno de los tramos del sistema puede variar entre 0,80 y 1,20 unidades de producto por hora. La Tabla V.1 resume los volúmenes de combustibles demandados por cada centro de recepción. El objetivo del problema es programar las operaciones de ingreso y distribución de productos a lo largo del horizonte, de forma de maximizar la utilización del poliducto y satisfacer los requerimientos establecidos en cada terminal, a mínimo costo de bombeo y degradación de especies por interfases. A diferencia del enfoque original introducido por Jittamai, la hipótesis de programación cíclica de envíos ya no se impone. Por el contrario, debe hallarse la mejor secuencia de productos y los tiempos más convenientes para el transporte de los “batches”. Mediante la resolución del modelo MILP se busca determinar el programa acíclico que requiera los menores costos.

Tabla V.1. Demandas de Combustibles y Costos de Transición

	Demandas de Combustibles (en unidades de volumen)			Costos de Interfases (10 ² US\$)			
	Destinos			Sucesor			
	Depósito D1	Depósito D2	Depósito D3	Predecesor	A	B	C
A	30	30	-	A	-	22,0	35,0
B	-	-	50	B	24,0	-	21,0
C	-	30	-	C	30,0	32,0	-

La disposición inicial de los envíos dentro del conducto incluye cuatro lotes en tránsito ($B5$, $B4$, $B2$ y $B1$) que transportan combustibles A , B , A y B , en ese orden. Por el propio ordenamiento físico del conjunto de lotes, $B5$ es el elemento más cercano al origen del sistema (fuente $S1$). Los tamaños de cada envío son: 20, 10, 30 y 20 unidades, respectivamente. Uno de los lotes iniciales ($B3$) está vacío, y se traslada en la interfase de los lotes $B2$ y $B4$. Como se verá más adelante, la presencia de este elemento posibilitará la inyección de combustible C desde la refinería $S2$ en futuras instancias del plan. Tal corrida de inyección de producto C en la línea podrá ejecutarse en el mismo momento en que el “batch” $B3$ alcance la ubicación del nodo de ingreso $S2$ (ver Figura V.11).

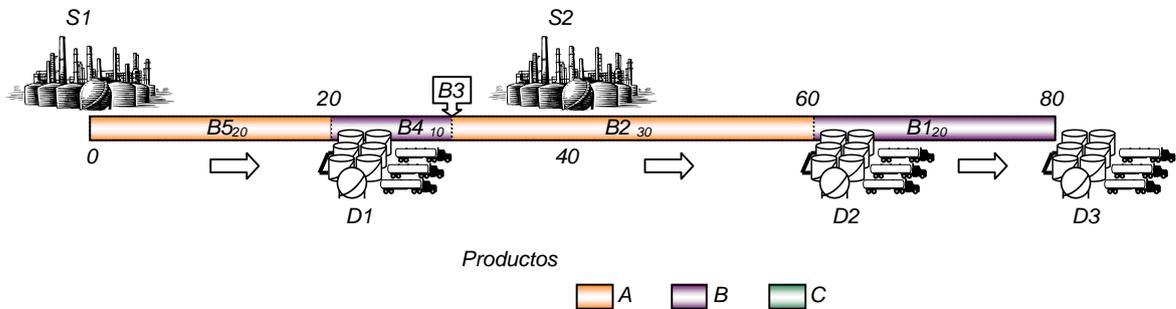


Figura V.11. Disposición Inicial de Envíos dentro del Poliducto para el Caso de Estudio

De nuevo, la introducción de dispositivos físicos de separación (“pigs”) entre combustibles disímiles ha sido descartada. Los costos de transición entre dos envíos consecutivos que involucran especies distintas se relacionan al reprocesamiento de volúmenes de “transmix” o a la degradación del combustible más valioso, al entrar en contacto con otro de calidad inferior. En particular, el costo de la interfase entre dos envíos sucesivos depende fundamentalmente de los productos mezclados. Por simplicidad, se supone que los costos de transición son independientes del caudal de transporte y de la distancia recorrida por los lotes, entre los nodos de origen y destino. Supongamos que un lote de combustible B transita por la tubería precedido en forma directa por otro lote que contiene especie A (secuencia A - B). El costo operativo atribuible al reprocesamiento del volumen de producto mezcla generado por esta secuencia se estima en 2200 (US\$) (ver Tabla V.1). Sin embargo, cuando el envío de B antecede al “batch” de A , el costo de la interfase es un tanto mayor: 2400 (US\$). La diferencia en el comportamiento

se atribuye a la presión que ejerce un combustible sobre otro, cuando su peso específico es mayor/menor que el de la especie que lo antecede dentro del conducto. Por lo tanto, no sólo se busca minimizar el número de transiciones en la secuencia de envíos, sino también adoptar el ordenamiento de combustibles con mayor grado de compatibilidad, para obtener ahorros importantes en los costos de las interfases. En el enfoque propuesto por Jittamai, los costos de transición directamente se ignoran.

Por otra parte, los costos de transporte se vinculan al número de estaciones de bombeo puestas en servicio en cada ejecución. De esta manera, se supone que el costo unitario de bombeo, expresado en dólares por unidad de volumen, depende del combustible introducido en el poliducto y de la fuente de ingreso donde se produce la inyección (ver Tabla V.2).

Tabla V.2. Costo de Bombeo por Unidad de Producto, en Cada Nodo de Ingreso

Costo de Bombeo (10 ² US\$ por unidad de volumen)		
Producto (<i>p</i>)	Punto de Ingreso	
	Fuente 1	Fuente 2
A	29,0	14,5
B	34,0	17,0
C	49,0	24,5

La función objetivo seleccionada no considera en forma explícita los costos de activación/desactivación de las unidades de bombeo. En su lugar, se ha especificado un tamaño mínimo admisible para las inyecciones de producto (Q_{\min}) y derivaciones hacia las terminales receptoras (D_{\min}) igual a 10 unidades de volumen. El objetivo es minimizar el número de transiciones de estados en cada segmento, de activo a inactivo y viceversa. Asimismo, el modelo supone que los combustibles refinados a transportar por el sistema estarán disponibles en los nodos de ingreso antes de comenzar su impulsión. Por último, a los efectos de evitar la inserción de lotes de tamaño excesivo, que puedan provocar secuencias inapropiadas al final del horizonte para atender futuras demandas, se impone un valor máximo al volumen de las inyecciones (Q_{\max}) igual a 30 unidades.

En las próximas secciones, se plantean dos variantes del caso de estudio propuesto. Las alternativas difieren en el modo de operación del poliducto: específico o segregado (Ejemplo V.1) y fungible o consolidado (Ejemplo V.2). En el primer ejemplo, cada uno de los combustibles puede ser abastecido por una única fuente de ingreso, mientras que en el segundo caso ambas fuentes de suministro proveen al sistema de todos los productos estandarizados. No obstante, para ambos ejemplos, la cantidad total de combustibles A , B y C introducidos en la línea a lo largo del horizonte de planeación será la misma. Hacia el final del capítulo se ampliará el horizonte de tiempo abordado en el programa, buscando evaluar la robustez del modelo y el impacto de la extensión del plan en el esfuerzo computacional requerido para su determinación.

V.7.1 Ejemplo V.1: Operación del Sistema en Modo Segregado

En el Ejemplo V.1 el poliducto principal con múltiples puntos de ingreso opera en modo segregado. Ambos centros de aprovisionamiento se han especializado en la producción de un número limitado de combustibles. De este modo, los conjuntos de productos abastecidos por ambos puntos de ingreso no presentan especies en común. El nodo de origen $S1$ provee los combustibles A y B , mientras que $S2$ sólo abastece la especie C . La disponibilidad de productos en tanques de las estaciones $S1$ y $S2$ a lo largo del horizonte se presenta en la Tabla V.3.

Tabla V.3. Disponibilidad de Productos en Cada Nodo de Ingreso (Ejemplo V.1)

Productos (p)	Volumen de Productos Disponibles (en unidades)	
	Puntos de Ingreso <i>Fuente 1</i>	<i>Fuente 2</i>
A	30	-
B	70	-
C	-	40

En resumen, se dispone de un total de 140 unidades de combustible para introducir en el sistema. En contraste con el ejemplo abordado por Jittamai en su tesis doctoral, cada lote de producto puede tener más de un

destino, y no es necesario prefijar el nodo de salida de cada envío apenas se inyecta en la tubería. En otras palabras, se propone un modo de operación segregado, pero más flexible en cuanto a la asignación dinámica de entregas a los centros de recepción. No obstante, la posibilidad de incrementar el tamaño de los lotes a través de inyecciones parciales en la estación intermedia S2 no es practicable.

El programa óptimo de operaciones para el poliducto con múltiples ingresos, que funciona en modo segregado, fue obtenido mediante la resolución del modelo MILP continuo en el tiempo, descrito a lo largo del presente capítulo. La evolución del sistema de transporte en el tiempo se ilustra corrida por corrida en el diagrama de la Figura V.12.

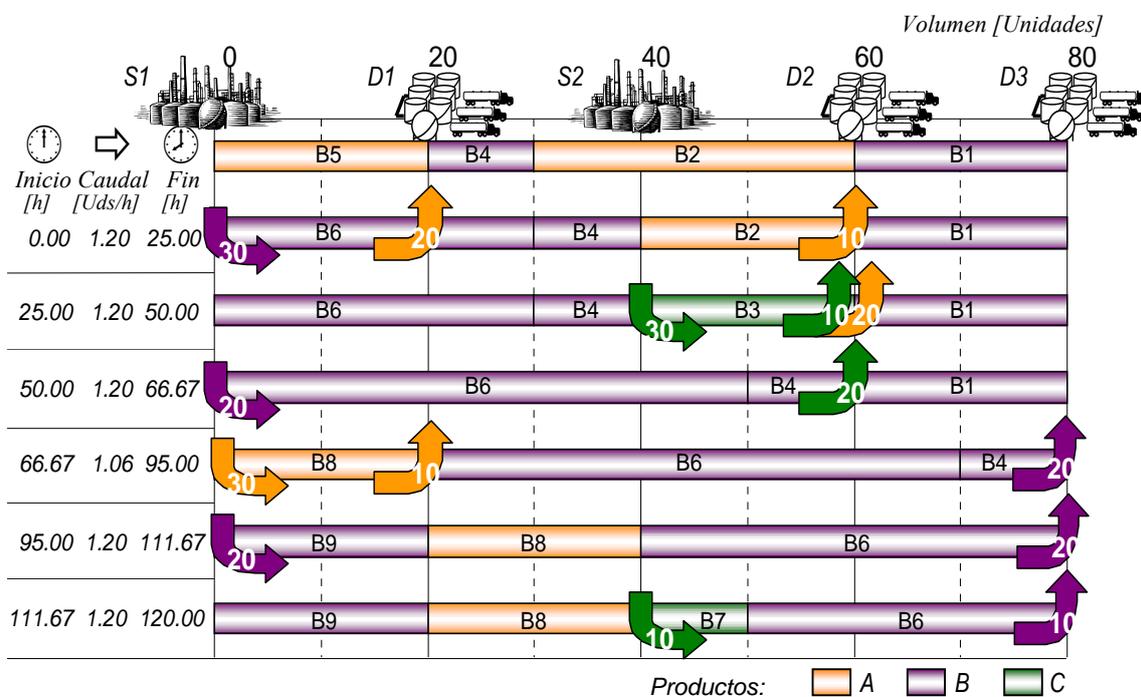


Figura V.12. Plan de Inyección y Derivación de Lotes Óptimo para el Ejemplo V.1

El programa de inyección incluye un total de seis nuevas ejecuciones. Cuatro de ellas impulsan material desde la terminal de origen S1, en los lotes B6, B6, B8 y B9, en ese orden, mientras que las dos restantes se desarrollan en la estación intermedia S2, insertando dos nuevos “batches”: B3 y B7. El lote B6, cuyo tamaño completo comprende 50 unidades volumétricas, se conforma a través de dos corridas de bombeo no consecutivas: k1 y k3. La primera etapa de inyección se detiene en el mismo instante en que la interfase

de los lotes $B2$ y $B4$ (con productos A y B) llega al nodo de ingreso $S2$. La interrupción del bombeo de $B6$, luego de impulsadas las primeras 30 unidades de combustible B , posibilita la inserción del nuevo “batch” $B3$ que transporta 30 unidades de C desde la terminal intermedia $S2$ hasta el centro de recepción $D2$. Tal como se ha señalado, el tren de lotes de partida incluye un “batch” vacío ($B3$) que se traslada sin contenido alguno hasta la coordenada del nodo $S2$.

En detalle, el plan de transporte provisto por el enfoque MILP propuesto incluye la siguiente secuencia de operaciones de ingreso y derivación de lotes:

- (k1) Desde el instante $t = 0,00$ h hasta $t = 25,00$ h, se impulsan las primeras 30 unidades de combustible B en el nuevo “batch” $B6$. Este volumen es provisto por la estación de origen $S1$, al máximo caudal de inyección posible: 1,20 unidades/hora. Durante esta primera ejecución, se desarrollan las siguientes operaciones de corte o “stripping” de “batches”: 10 unidades de producto A provenientes del envío $B2$ se transfieren a los tanques de la terminal $D2$, y otras 20 unidades de A contenidas en el lote $B5$ se abastecen al depósito $D1$. Es importante notar que en el momento de efectuar la derivación de producto A hacia el nodo $D2$ no existe flujo de combustibles en el último tramo de tubería que comunica las dos terminales más alejadas ($D2$ y $D3$). En forma análoga, el segmento que une $D1$ con $D3$ permanece inactivo cuando el operador de la línea entrega combustible sólo a la terminal $D1$.
- (k2) Entre $t = 25,00$ h y $t = 50,00$ h, el plan prevé el ingreso de combustible C en la terminal intermedia $S2$. Un lote vacío ($B3$) proveniente del horizonte previo y ubicado en la interfase de los envíos $B2$ y $B4$ ha avanzado en su recorrido hasta alcanzar la localización volumétrica del nodo $S2$ ($\sigma_{S2} = 40$). De esta manera, la fuente intermedia puede iniciar la nueva corrida de inyección que involucra 30 unidades de producto C destinadas al centro $D2$. Durante el bombeo de $B3$ se programan dos derivaciones hacia la terminal $D2$ a razón de 1,20 unidades/hora. En primer lugar, se reciben las 20 unidades remanentes de A contenidas en $B2$, y a continuación arriban 10 unidades de C provenientes del propio “batch” $B3$. La inyección de las últimas 10 unidades de $B3$ en el nodo $S2$ inducen la transferencia de un volumen equivalente del mismo combustible hacia el depósito $D2$.

- (k3) En forma inmediata y hasta la hora $t = 66,67$ h, se retoma la impulsión del lote $B6$ en la refinería $S1$, inyectando otras 20 unidades de producto B en el sistema. La única operación de transferencia programada consiste en despachar las 20 unidades de C contenidas en el envío $B3$ hacia el depósito $D2$. A tiempo $t = 66,67$ h, los “batches” $B5$, $B3$ y $B2$ han desaparecido, y todo el conducto se encuentra lleno de combustible B . Una de las ventajas de la nueva formulación propuesta es que un mismo lote de combustible puede inyectarse en dos corridas de bombeo no consecutivas. Los modelos presentados en capítulos previos asumen que cada nueva ejecución se asocia a un nuevo “batch”, distinto a todos los anteriores. Como resultado, puede proponerse un conjunto inicial de lotes significativamente menor, y obtener la solución óptima del problema con un esfuerzo computacional más bajo.
- (k4) Sin mediar interrupciones, en el intervalo $[66,67$ h; $95,00$ h] se programa la inyección de 30 unidades adicionales de la especie A desde la misma fuente $S1$ dentro de un nuevo “batch” $B8$, a un caudal de 1,06 unidades/hora. Esta operación de ingreso posibilita la derivación de dos partidas: 20 unidades de B contenidas en el “batch” $B1$ se transfieren al destino $D3$, y 10 unidades de A provenientes del propio envío $B8$ se descargan en tanques de la terminal $D1$. Durante la entrega al depósito $D3$, toda la extensión del poliducto permanece activa, mientras que sólo el primer tramo $S1-D1$ se pone en movimiento cuando el destino $D1$ recibe al combustible A . Es importante remarcar que un nuevo lote vacío $B7$ entre los envíos $B8$ y $B6$ se dirige hacia el nodo $S2$. La misma solución MILP ha pospuesto la inyección del “batch” $B7$ hasta que éste alcance la coordenada de la fuente $S2$. El objetivo es reservar un nuevo elemento del conjunto de lotes para el transporte de combustible C , sólo disponible en la estación intermedia $S2$.
- (k5) De inmediato, un nuevo “batch” ($B9$) con 20 unidades de combustible B es bombeado desde el origen del poliducto ($S1$). La inyección, iniciada a la hora $t = 95,00$ h y extendida hasta $t = 111,67$ h, presenta un caudal máximo de 1,20 unidades/hora. En el transcurso de esta nueva corrida, 20 unidades de producto B provenientes de los lotes $B4$ y $B6$ se transfieren y almacenan en tanques del último destino ($D3$). Durante esta ejecución, existe movimiento de material a lo largo de todo el conducto.

(k6) La última instancia de bombeo del programa se desarrolla en la terminal intermedia. En el instante $t = 111,67$ h, el “batch” vacío $B7$ arriba a la coordenada del nodo $S2$, facilitando la inyección de un volumen adicional de combustible C . Desde $t = 111,67$ h y hasta el final del horizonte (120,00 h) un nuevo lote con 10 unidades de C se impulsa desde la fuente $S2$ a razón de 1,20 unidades/hora. De este modo, se coordina el despacho de 10 unidades de producto B provenientes del “batch” $B6$ al destino $D3$. Como consecuencia, el tramo de tubería que une los dos centros de ingreso de material ($S1-S2$) permanece detenido. La secuencia final de lotes dentro del conducto comprende cuatro envíos ($B9$, $B8$, $B7$ y $B6$) que transportan 20, 20, 10 y 30 unidades de combustibles B , A , C y B , respectivamente.

Las estadísticas del modelo y los resultados computacionales del proceso de resolución se resumen en la Tabla V.4. La formulación MILP incluye 297 variables binarias, 1076 variables continuas y 2180 restricciones. El programa de operaciones óptimo hace uso del poliducto a lo largo de todo el horizonte. El mismo fue hallado en tan solo 12,5 segundos de CPU, utilizando el algoritmo GAMS/CPLEX 11.0, implementado en un procesador Intel 2.80 GHz. El mínimo costo operativo hallado suma 444000 (US\$), de los cuales 21000 (US\$) corresponden a costos de reprocesamiento del material de interfase.

Tabla V.4. Estadísticas de los Modelos y Resultados Computacionales para los Ejemplos V.1 y V.2

Ej.	Ecua- ciones	Variab les Continuas	Variab les Binarias	Tiempo de CPU (s)	No. de Itera- ciones	Soluc ión Óptima (10 ² US\$)	Utiliza- ción del Poliducto (%)	Costo de Inter- fases (10 ² US\$)
V.1	2180	1076	297	12,5	54188	4440,0	100	210,0
V.2	2421	1280	304	45,3	180168	4267,0	100	202,0

De la Figura V.12 se desprende que la secuencia óptima de inyección $A-B-C-A-B$ favorece las transiciones $A-B$, $B-C$ y $C-A$, con interfases de menores costos. La metodología heurística propuesta por Jittamai se enfoca en las ventanas de tiempo impuestas al despacho de los combustibles hacia las

terminales de recepción, con el único objetivo de minimizar las violaciones a estos compromisos. Desde luego, el programa de transporte obtenido involucra un número de inyecciones más alto, para completar a término la entrega de cada orden de traslado. En diversas ocasiones, las órdenes de los usuarios se satisfacen a través de múltiples despachos parciales, y los costos de transición se elevan en forma notoria. Para mitigar estos efectos, el procedimiento heurístico de Jittamai incluye una fase posterior de consolidación de envíos, en la cual los lotes “cercaños” que involucran una misma especie se combinan en un único “batch”. Esta acción correctiva produce una reducción en el número de corridas, pero al mismo tiempo genera un incremento en las violaciones de las ventanas de tiempos de los despachos. En la sección de resultados, el autor propone dos alternativas de consolidación. Una de ellas deriva en la secuencia de productos [*B-C-A-B-C-A...*], similar a la obtenida a través del enfoque riguroso de tiempo continuo propuesto en este capítulo. No obstante, como Jittamai ha ignorado los costos de reprocesamiento de interfases, no parece acertado realizar una comparación más detallada entre los resultados de ambas metodologías.

V.7.2 Ejemplo V.2: Operación del Sistema en Modo Fungible

El segundo ejemplo de aplicación involucra al mismo sistema de transporte descrito en secciones previas, aunque en este caso la tubería puede operar en modo fungible o consolidado. En efecto, ambas fuentes *S1* y *S2* abastecen el conjunto completo de especies (*A*, *B* y *C*) que demandan las terminales de recepción. Por lo tanto, las inyecciones de combustible en el nodo intermedio *S2* pueden insertar nuevos envíos en posiciones abiertas de la secuencia, o proveer cantidades adicionales de producto, incrementando el tamaño de los “batches” que transitan por la línea, provenientes del nodo *S1*. Como el poliducto opera en modo fungible, se asume que ambas refinerías producen especies análogas, que cumplen con las mismas especificaciones estándar impuestas por el transportista.

Una de las ventajas de la operación de ductos en modo fungible es la reducción en el número de lotes e interfases generadas, obteniendo ahorros significativos en los costos de degradación y reprocesamiento del material. Sin embargo, estos beneficios sólo pueden alcanzarse mediante una coordinación efectiva entre los envíos conjuntos de varias unidades productivas. La consolidación de lotes del mismo producto, inyectado en fuentes de suministro

distintas, y la satisfacción a término de las necesidades de los centros de demanda, requieren de una selección muy cuidadosa de la secuencia y la dimensión de los “batches”, así como de los tiempos exactos en que se produce cada impulsión de combustibles dentro de la tubería. En resumen, el desarrollo del programa óptimo de inyección y descarga de productos en un sistema que opera en modo fungible es un problema industrial sumamente complejo.

La Tabla V.5 muestra la disponibilidad de combustibles *A*, *B* y *C* en tanques de las refinerías *S1* y *S2* a lo largo de todo el horizonte de planeación. Al igual que en el Ejemplo V.1, el volumen total inyectado suma 140 unidades, aunque la distribución de ese volumen entre ambas fuentes de suministro es particularmente distinta. En este caso, los tanques de la terminal *S1* no sólo proveen productos *A* y *B*, sino también la especie *C*. De nuevo, las órdenes de transporte en cada centro de recepción deben completarse antes de la hora $t = 120$ h. Además, la disposición inicial de envíos dentro del conducto incluye un lote vacío (*B3*) en la interfase de los “batches” *B4* y *B2*. La Tabla V.1 y la Figura V.11 describen las condiciones de partida del plan.

Tabla V.5. Disponibilidad de Combustibles en Cada Fuente (Ejemplo V.2)

Productos (<i>p</i>)	Volumen de Productos Disponibles (en unidades)	
	Puntos de Ingreso	
	<i>Fuente 1</i>	<i>Fuente 2</i>
<i>A</i>	20	10
<i>B</i>	40	30
<i>C</i>	20	20

El programa óptimo de operaciones obtenido para el Ejemplo V.2 se ilustra en la Figura V.13. Como las demandas de todos los productos deben atenderse desde dos nodos de ingreso alternativos (*S1* y *S2*) el número de inyecciones planeadas se eleva a siete. La necesidad de impulsar a todas las especies de combustibles *A*, *B* y *C* desde las dos fuentes *S1* y *S2* produce un incremento en el número de ejecuciones requeridas, y en las propias dimensiones del modelo. Por el contrario, el número de lotes movilizados a través de la tubería es menor que el número de envíos previstos por el

programa óptimo del Ejemplo V.1. A pesar de que las corridas de bombeo se elevan de seis a siete, los nuevos “batches” impulsados son tan solo cuatro. Ciertas inyecciones de combustible en la estación intermedia S2 únicamente aportan material a otros lotes en tránsito. Esto facilita la reducción de los costos asociados a las interfases.

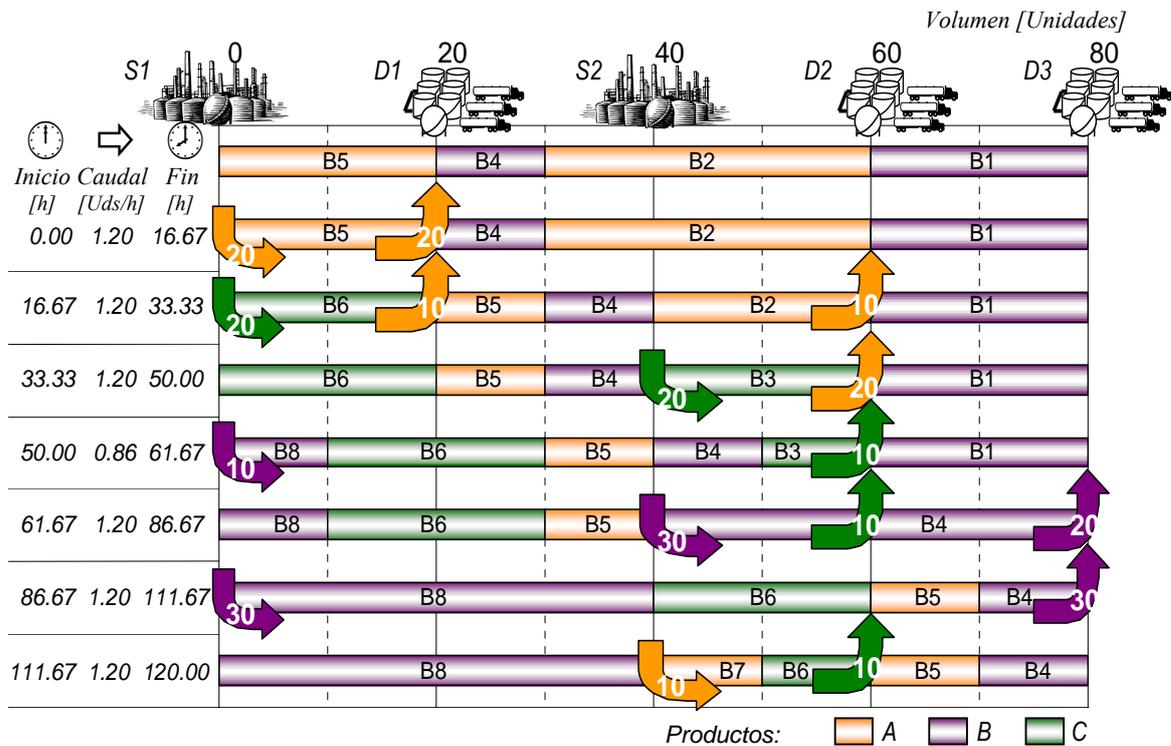


Figura V.13. Programa Óptimo de Operaciones del Poliducto para el Ejemplo V.2

El plan de transporte de combustibles desde las terminales de ingreso S1 y S2 incluye la siguiente secuencia de operaciones:

- (k1) Desde el instante $t = 0,00$ h hasta $t = 16,67$ h, 20 unidades adicionales de combustible A se introducen en el lote B5 (refinería S1) a un caudal de 1,20 unidades/h. El programa de despachos indica que la primera terminal (D1) debe recibir un volumen equivalente del mismo producto A contenido en el propio lote B5.
- (k2) La siguiente corrida de impulsión también se desarrolla en el nodo S1, a partir de la hora $t = 16,67$ h y hasta $t = 33,33$ h, insertando un nuevo lote (B6) con 20 unidades de combustible C. El desplazamiento de B6 en el primer tramo del conducto permite la entrega de 10 unidades de A desde el “batch” B2 al destino D2, y otras 10 unidades de A provenientes del lote B5 al depósito D1. Para minimizar el número de

segmentos inactivos, el operador de la línea puede coordinar la entrega simultánea hacia ambos destinos. La estrategia es facilitar la derivación intermedia o “entrega al paso” en $D1$, al tiempo que los lotes se trasladan aguas abajo induciendo el despacho hacia el centro $D2$ (Hane y Ratliff, 1995). No obstante, estas decisiones operativas de menor nivel suelen adoptarse en la fase de optimización de bombas, a través de la resolución de modelos más detallados.

- (k3) Al finalizar la segunda ejecución, el “batch” vacío $B3$, ubicado en la interfase de los lotes $B2$ y $B4$, ha alcanzado la coordenada precisa del nodo $S2$. En ese mismo momento, se transfiere el control de ingreso a la fuente intermedia, que introduce el nuevo lote $B3$, con 20 unidades de combustible C , durante el intervalo [33,33 h; 50,00 h]. Entretanto, las 20 unidades remanentes de producto A transportadas en el “batch” $B2$ se entregan al destino $D2$.
- (k4) Las operaciones de bombeo se retoman en la estación cabecera ($S1$) a la hora 50,00. Desde entonces y hasta el instante $t = 61,67$ h, un nuevo lote con 10 unidades de producto B , denominado $B8$, se introduce en el origen de la tubería haciendo posible la transferencia de 10 unidades de combustible C (“batch” $B3$) hacia los tanques del nodo $D2$. De nuevo, no existirá flujo de material en el último tramo $D2-D3$. Tal como en el ejemplo anterior, el “batch” $B7$ se ha reservado para un futuro bombeo de material desde el nodo intermedio. En efecto, este nuevo elemento de desplazará vacío entre el origen y la terminal $S2$.
- (k5) A tiempo $t = 61,67$ h, se detiene el bombeo de B en el centro $S1$ para transferir el control a la estación intermedia $S2$. Un nuevo envío con 30 unidades de combustible B se inyecta en la línea, incrementando el tamaño de uno de los lotes de partida proveniente de un horizonte previo: $B4$. En el transcurso de esta nueva ejecución, se prevén dos operaciones de corte. Las 10 unidades remanentes de producto C contenidas en el lote $B3$ se descargan en el destino $D2$, y 20 unidades de combustible B se derivan desde el “batch” $B1$ al depósito $D3$.
- (k6) La corrida siguiente retoma las operaciones en el nodo $S1$, completando la impulsión del nuevo envío $B8$. Una partida adicional de 30 unidades de producto B se incorpora a $B8$, y un volumen equivalente de la misma

especie se transfiere desde el lote más distante ($B4$) hacia los tanques del destino $D3$.

($k7$) Cuando $t = 111,67$ h, el lote vacío $B7$ ubicado en la interfase $B6-B8$ alcanza la coordenada de la fuente $S2$. A partir de entonces, se programa la inyección de las últimas 10 unidades de combustible A en el nodo intermedio. Mientras tanto, otras 10 unidades de C contenidas en el “batch” $B6$ se derivan hacia el destino $D2$. La disposición final de envíos dentro de la tubería involucra un total de cinco lotes ($B8, B7, B6, B5$ y $B4$) con 40, 10, 10, 10 y 10 unidades de combustibles B, A, C, A y B , respectivamente.

Las estadísticas del modelo resuelto y el desempeño computacional para el segundo ejemplo se resumen en la última fila de la Tabla V.4. La operación del sistema en modo fungible o consolidado permite obtener un programa de transporte más económico, con un costo total de 426700 (US\$), lo cual representa un ahorro diario de 3460 (US\$) respecto de las operaciones en modo segregado. Algunos ahorros devienen del menor número de interfases, cuyo costo disminuye de 21000 (US\$) a 20200 (US\$). A pesar de introducir el mismo volumen de combustibles a lo largo de todo el horizonte, el número de nuevas ejecuciones se incrementa en uno. En ambos ejemplos, se programan tres impulsiones de combustible B y dos de producto C . Sin embargo, cuando se trabaja en modo consolidado, existen dos inyecciones de la especie A , una en cada fuente de suministro.

Sorprendentemente, el número de nuevos lotes que fluyen dentro del poliducto es tan solo cuatro. Algunas inyecciones de material en el nodo intermedio $S2$ incrementan el tamaño de otros envíos en tránsito, reduciendo los costos de degradación de combustibles por interfases. Un análisis simple de la Figura V.13 demuestra que gran parte de las demandas de material en los depósitos $D2$ y $D3$ se satisfacen mediante la derivación de combustibles provenientes de la estación intermedia $S2$, mucho más próxima a estos destinos. Como resultado, el costo de transporte se reduce de 423000 a 406500 (US\$), a pesar de que un lote del combustible más pesado (C) debe trasladarse desde el origen de coordenadas del sistema ($S1$). En modo segregado, las impulsiones de producto C sólo parten de la refinería intermedia $S2$.

La formulación matemática MILP del Ejemplo V.2 involucra 304 variables binarias, 1280 variables continuas y 2421 restricciones. Respecto del

ejemplo anterior, el nuevo modelo presenta un crecimiento limitado de sus dimensiones. Como todas las especies transportadas (A , B y C) están disponibles en ambos centros de abastecimiento, es necesario ampliar la cardinalidad del conjunto de ejecuciones $|K|$. Al igual que en el primer ejemplo, la línea opera sin interrupciones. El plan de transporte óptimo se halla en 45,3 segundos de CPU, en un total de 180168 iteraciones. Según se ha remarcado, el incremento en el costo computacional se explica a partir de manejar un mayor número de especies en ambos nodos de ingreso.

Para obtener el programa detallado de entregas en cada una de las terminales de recepción, se debe determinar la secuencia de operaciones de “corte” y derivación de lotes asignados a cada corrida, con sus respectivos tiempos de inicio y finalización. En efecto, las transferencias de combustibles hacia los tanques de los destinos suelen producirse en dos o más etapas. Más aún, pueden incluso realizarse en simultáneo, evitando la detención innecesaria de ciertos tramos de tubería. El objetivo de esta nueva instancia del problema consiste en minimizar el número de detenciones parciales del poliducto a lo largo del horizonte, optimizando la operación de bombas, válvulas y otros dispositivos que componen el sistema. Otra característica del enfoque propuesto es la posibilidad de modelar puntos intermedios de ingreso de combustibles provenientes desde poliductos laterales. En pocas palabras, el nuevo enfoque representa un avance importante hacia la planeación del transporte a través de redes de poliductos interconectados.

V.7.3 Ejemplo V.3: Programación de Poliductos en Horizontes Extendidos

Para analizar el impacto de la duración del horizonte temporal en el costo computacional de resolución del problema, se han abordado los mismos ejemplos presentados en las secciones previas, extendidos a horizontes de 7 y 10 días (168 h y 240 h). Como la longitud del horizonte de tiempo es mayor, deben incluirse nuevas demandas de combustible en las terminales del poliducto. Supondremos que los requerimientos adicionales de material en cada centro de recepción siguen el patrón de demandas planteado para los primeros cinco días (120 h). Dicho de otro modo, se supone que las órdenes de transporte se incrementan proporcionalmente, según el patrón de demanda dado para los Ejemplos VI.1 y VI.2. Las necesidades de combustible para los próximos 7 y 10 días (168 h y 240 h) se presentan en la Tabla V.6. En forma análoga, la disponibilidad de combustibles en ambas terminales de ingreso se

amplía con la duración del horizonte, ya sea para operaciones en modo segregado como en modo fungible. Asimismo, el tamaño máximo de las inyecciones se ha incrementado a 40 unidades volumétricas, limitando así el crecimiento en el número de interfases.

Tabla V.6. Demanda de Combustibles en Horizontes Extendidos

Duración del Horizonte = 168 h				Duración del Horizonte = 240 h			
	Destinos			Destinos			
	Depósito 1	Depósito 2	Depósito 3	Depósito 1	Depósito 2	Depósito 3	
A	42	42	-	A	60	60	-
B	-	-	70	B	-	-	100
C	-	42	-	C	-	60	-

La Tabla V.7 resume los resultados computacionales obtenidos para cada instancia del problema, que incluyen: el costo óptimo de operación, la contribución de los costos de transporte y reprocesamiento de interfases, el número de “batches” y campañas de inyección incluidas en el programa óptimo, y el tiempo de CPU requerido. Para horizontes extendidos, la cantidad de envíos y corridas de bombeo crece. En consecuencia, las dimensiones del modelo aumentan, y el tiempo de CPU que insume el procedimiento de búsqueda es un tanto mayor. No obstante, el costo computacional se mantiene en valores aceptables.

Tabla V.7. Influencia del Horizonte de Planeación en la Resolución del Problema

Modo Operativo	Largo del Horizonte (h)	Lotes $ I $	Corridas de Bombeo $ K $	Solución Óptima (10 ² \$)	Costo de Interfases (10 ² \$)	Costo de Bombeo (10 ² \$)	Tiempo de CPU (s)
Segregado	120	9	6	4440,0	210,0	4230,0	12,5
	168	9	8	6132,0	210,0	5922,0	47,1
	240	10	8	8638,0	228,0	8410,0	97,9
Fungible	120	8	7	4267,0	202,0	4065,0	45,3
	168	8	8	5982,0	182,0	5800,0	134,5
	240	9	10	8165,0	235,0	7930,0	341,5

Independientemente de la amplitud del horizonte y el modo de operación del poliducto, existe en todos los casos una utilización plena de la capacidad de transporte, manteniendo el caudal promedio en 1,167 [unidades/h]. Éste es el caudal mínimo de material que evita la generación de “backorders” o incumplimientos en la demanda de las terminales receptoras, y permite un funcionamiento ininterrumpido del poliducto durante todo el horizonte. La Figura V.14 describe el programa óptimo de operaciones obtenido para el sistema de transporte que opera en modo consolidado o fungible, extendido sobre un horizonte de 10 días.

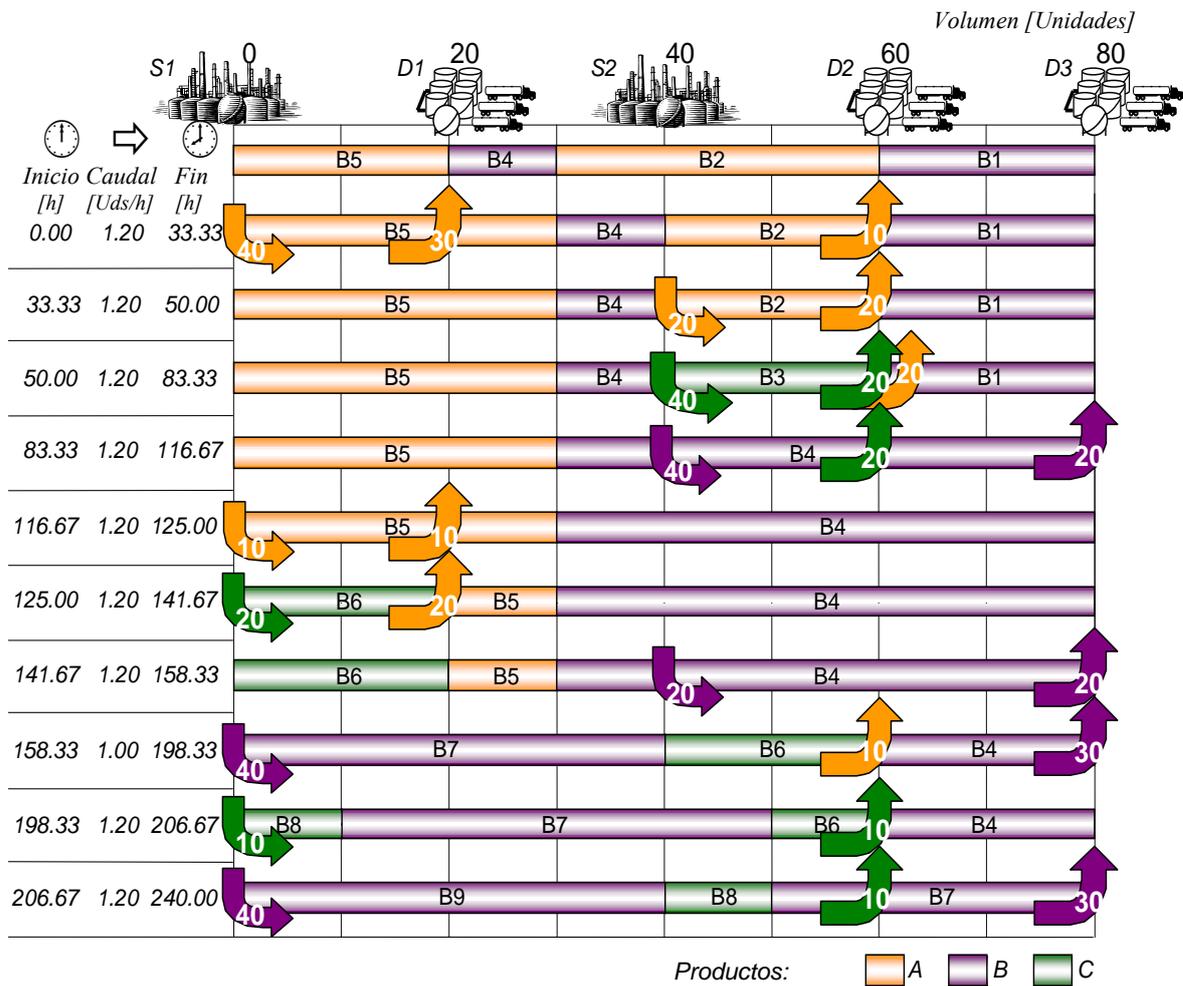


Figura V.14. Programa Óptimo de Transporte en Modo Fungible para un Horizonte de 10 días

V.8 Conclusiones Preliminares

A lo largo de este capítulo, se ha presentado la primera formulación matemática MILP de escala continua para la planeación del transporte por

poliductos con múltiples puntos de ingreso de material. El objetivo del problema consiste en programar las operaciones de inyección y distribución de combustibles a lo largo del horizonte, buscando maximizar el nivel de utilización del sistema de transporte y satisfacer a término las demandas de las terminales receptoras, a mínimo costo de impulsión y reprocesamiento de interfases. El desarrollo del nuevo modelo se basa en el enfoque presentado en el capítulo previo para la programación de tuberías con una única estación cabecera y múltiples destinos. En consecuencia, la estructura principal del programa matemático se sustenta sobre dominios continuos, en ambas escalas de tiempo y volumen.

Al transportar lotes de diferentes productos refinados desde diversas fuentes de suministro a múltiples terminales carga, la operación de poliductos “common-carriers” con más de un nodo de ingreso involucra la ejecución secuencial de corridas de bombeo, cada una de las cuales permite el acceso de combustibles desde un centro de inyección por vez. Una diferencia sustancial respecto de las representaciones con fuente única es la necesidad de especificar el nodo de origen donde se inicia la impulsión. Otra característica importante de las tuberías con múltiples accesos es la inserción de nuevos lotes en posiciones intermedias del trayecto. Por lo tanto, los “batches” que transitan por el ducto no necesariamente se ordenan según la misma secuencia cronológica en que fueron inyectados. Asimismo, en tuberías que operan en modo fungible, ciertas inyecciones de producto en nodos intermedios no generan nuevas interfases sino solo incrementan el tamaño de alguno de los lotes en tránsito. Estas condiciones complican seriamente el seguimiento y la evaluación de los costos de las interfases.

Como las corridas de bombeo y los lotes de productos ya no se ordenan del mismo modo, el nuevo enfoque maneja ambos elementos como entidades matemáticas distintas. A partir de esta idea sencilla, la formulación propuesta conserva un conjunto pre-ordenado de lotes dentro de la tubería, reservando elementos de la secuencia para aquellos “batches” que serán introducidos en estaciones intermedias. En la interfase de dos envíos adyacentes, un lote vacío transita desde el origen del conducto hasta la terminal de ingreso asignada. Cuando el lote alcanza la posición correcta, comienza la corrida de inyección de combustible y el volumen del envío adopta dimensiones finitas. Por medio de la asignación de productos a lotes ordenados se establece la secuencia de

transporte de combustibles, y la evaluación de los costos de interfases se convierte en una tarea mucho más simple.

La definición de conjuntos diferentes para las corridas y los lotes produce un crecimiento limitado en las dimensiones del modelo y en el costo computacional del procedimiento resolutivo. Como el número óptimo de nuevas ejecuciones y “batches” a inyectar no se conoce con certeza antes de resolver el problema, ambos valores deben adoptarse en forma arbitraria al abordar el plan. No obstante, se ha encontrado una regla sencilla que permite estimar en forma apropiada el número de inyecciones y de nuevos lotes requeridos. La formulación MILP propuesta para la programación de poliductos con múltiples terminales de ingreso se ha aplicado con éxito a un sistema de transporte por tuberías, que involucra dos refinерías o fuentes de suministro y tres centros de recepción, transportando tres especies distintas de combustibles refinados. En el análisis del problema se consideraron dos modos de operación convencionales. Comparado con el modo segregado, la consolidación de envíos en lotes comunes (modo fungible) permite incrementar el tamaño de “batches” en tránsito a través de inyecciones parciales en estaciones intermedias. De esta forma, pueden alcanzarse importantes reducciones en los costos de bombeo y degradación de combustibles por interfases.

En el próximo capítulo de la tesis, se extenderá el enfoque presentado a sistemas de transporte por poliductos interconectados, con múltiples fuentes de aprovisionamiento de combustibles que pueden operar de manera coordinada. Este modelo sentará las bases para el futuro abordaje de redes ramificadas de poliductos, a través de un enfoque riguroso de representación en escalas continuas de tiempo y volumen.

Capítulo VI

Planeación del Transporte de
Combustibles en Redes de
Poliductos Coordinados

VI.1 Introducción

El modelo de planeación del transporte de combustibles por poliductos con múltiples terminales de inyección, constituye un paso sumamente importante hacia la programación de redes de transporte todavía más complejas. Las redes de poliductos o “pipeline networks” son sistemas logísticos interconectados por tuberías donde pueden desarrollarse operaciones simultáneas de inyección de combustibles en distintas fuentes de suministro. Sumado a ello, los centros logísticos que almacenan los productos suelen estar conectados directamente a otras terminales a través de distintos poliductos, conformando ramificaciones o derivaciones laterales. Más aún, una terminal de aprovisionamiento puede estar vinculada a un centro de recepción a través de más de un poliducto, y en ciertos casos puntuales la dirección del flujo puede incluso invertirse (poliductos bidireccionales). Como resultado, existen rutas o secuencias de tuberías alternativas para movilizar los lotes desde un centro de origen hacia un destino establecido.

Hasta el día de hoy, son escasas las representaciones propuestas en la literatura del área que han conseguido resultados promisorios en el desarrollo de programas de inyección y entrega de lotes de combustibles a través de redes de poliductos interconectados. El enfoque continuo presentado en el capítulo previo constituye la primera propuesta de tipo monolítica que ha logrado reproducir el funcionamiento riguroso de poliductos con múltiples puntos de ingreso de combustibles a lo largo del trayecto. Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada a redes de poliductos donde cada par de nodos está conectado por una única tubería, y se puede ejecutar una sola inyección de productos por vez. Uno de los desafíos más importantes a afrontar consiste en resolver la programación integral de una red de poliductos en la cual se inyectan múltiples lotes en diferentes puntos de ingreso, en forma coordinada.

Contribuciones a la Planeación del Transporte en Redes de Poliductos

En los últimos años, se han propuesto algunas técnicas de naturaleza discreta para abordar sistemas de distribución por poliductos de escala real, con múltiples nodos de origen y recepción de combustibles. A pesar de la topología compleja que presentan las redes de poliductos, es común la aplicación de principios simples para la programación de sus operaciones. Cuando un nuevo lote se inyecta en la sección de ingreso a un poliducto, otro

volumen equivalente se expulsa en el extremo opuesto, pudiendo transferirse en forma directa hacia una tubería contigua (operación conocida como “tightlining”) o almacenarse en los tanques de la terminal receptora. En forma análoga, un poliducto puede recibir material de una terminal de tanques que opera como fuente de aprovisionamiento, o coleccionar material desde otra tubería adyacente, aguas arriba del sistema, a través de la transferencia directa del combustible.

Neves y colab. (2007) presentaron un algoritmo computacional que utiliza una técnica de descomposición para generar el programa de operaciones en redes de poliductos, sobre un horizonte de tiempo mensual. El procedimiento de resolución se divide en dos etapas. El primer módulo, denominado bloque de pre-procesamiento, hace uso de metodologías heurísticas para determinar el conjunto de secuencias de lotes a inyectar en cada tubería, a partir de los requerimientos de los destinos, el plan de producción de las refinerías, y los tamaños de lote característicos de cada combustible. Asimismo, ese bloque heurístico determina las ventanas de tiempo dentro de las cuales deberían desarrollarse las operaciones de impulsión y derivación de lotes. En una segunda instancia, la información pre-procesada ingresa al módulo de optimización MILP de tiempo continuo, que permite establecer los instantes precisos de inicio y culminación de las inyecciones de lotes en los diferentes puntos de ingreso, y los despachos de combustibles en cada terminal. Al considerar las variaciones en el costo unitario de la energía eléctrica por franja horaria, el modelo incluye un único conjunto de variables discretas (0-1) que prohíben la operación de las bombas en períodos pico de demanda eléctrica.

Por su parte, Mori y colab. (2007) introdujeron un modelo de simulación de eventos discretos para estudiar el plan detallado de operaciones en una red de poliductos de escala real. El simulador propuesto fue utilizado en combinación con un paquete de optimización elemental de corto plazo, que provee los distintos programas de transporte a ser evaluados. La herramienta de simulación permite visualizar los potenciales conflictos que podrían presentarse en la asignación de lotes a una misma tubería, el movimiento de los envíos a través de la red, los tiempos de inicio y finalización de las operaciones de “corte” de “batches” en tránsito durante cada corrida de bombeo, y la gestión de los stocks en las terminales de aprovisionamiento y recepción de productos. Finalmente, es posible obtener reportes sobre algunas

medidas de desempeño de los poliductos, tales como el porcentaje de utilización y el total de volumen transportado.

Un año más tarde, Boschetto y colab. (2008) reformularon el enfoque híbrido de Neves y colab. (2007) utilizando una nueva estrategia de descomposición que involucra tres bloques: (i) un módulo de asignación de recursos, que determina el conjunto de secuencias de inyección de productos en cada línea, (ii) una etapa de pre-análisis, que especifica los volúmenes precisos de los lotes a ser impulsados y recibidos en las terminales de origen y destino, así como los tiempos más tempranos de inicio y culminación de las operaciones de “corte” de “batches” en los nodos de descarga, y (iii) un último modelo de programación MILP de tiempo continuo que establece los intervalos de tiempo exactos para las operaciones de inyección y derivación de combustibles desde/hacia cada uno de los centros logísticos.

Otra de las metodologías híbridas, que combina técnicas heurísticas de construcción aleatoria y modelos avanzados de programación con restricciones (CP) fue desarrollada por Moura y colab. (2008). Una primera fase de planeación recurre al uso de reglas heurísticas para generar el conjunto de unidades de transporte (denominadas órdenes de despacho) especificando para cada una de ellas el volumen, el nodo de origen, el destino, el tipo de producto, la ruta de ductos y la fecha de entrega posible. La segunda instancia de programación considera el conjunto de órdenes de despacho y establece la secuencia y los tiempos de inicio de cada operación de bombeo en las diferentes tuberías que conforman la red. En esta segunda etapa se implementan dos modelos CP. El primero de ellos provee la secuencia de impulsión de lotes en cada nodo de acceso y las ventanas de tiempo para el inicio de las corridas de bombeo correspondientes. Luego, un segundo modelo CP todavía más sencillo determina el número de operaciones asociadas a cada orden de despacho, así como los tiempos exactos de cada ejecución. El despacho de una orden puede interrumpirse y retomarse más tarde, dando lugar al transporte de productos más urgentes que deben utilizar un mismo segmento de tubería, o simplemente para evitar los periodos de alto costo energético.

Los enfoques por descomposición descritos en este apartado se aplicaron, en todos los casos, a redes de transporte por poliductos de escala real de la industria petrolera brasileña. En particular, se ha buscado planificar las operaciones en sistemas de distribución de combustibles refinados, desde

múltiples fuentes de suministro (refinerías y puertos) hacia diversos centros de recepción. Asimismo, se han tenido en cuenta ciertas características estructurales tales como la interconexión de nodos a través de más de una tubería, terminales de doble propósito (impulsión/recepción de productos) y poliductos bidireccionales. La mayor dificultad en el proceso de planeación de las operaciones deviene de tres tareas complejas: la secuenciación de los envíos, el dimensionamiento de los “batches” y la asignación de los lotes a cada terminal de recepción. Una vez seleccionadas estas variables por medio de metodologías heurísticas aproximadas, las decisiones restantes pueden fijarse en tiempos de CPU más acotados. Sin embargo, el programa de operaciones obtenido depende fuertemente de las decisiones adoptadas en los módulos heurísticos de pre-procesamiento, y en muchos casos presentan resultados insatisfactorios (Boschetto y colab., 2008).

Representación Continua de la Red de Poliductos

En el capítulo precedente, se ha elaborado la primera formulación MILP continua en tiempo y volumen para la programación de una red elemental de poliductos unidireccionales con múltiples nodos de ingreso y egreso de combustibles. El modelo constituye el primer enfoque monolítico (“single-level”) que determina en un solo paso los programas de inyección y descarga de combustibles, de manera muy eficiente. Dados los requerimientos de productos y las fechas de entrega pactadas con las terminales de distribución, el modelo propuesto determina el tamaño, el nodo de origen y los destinos de cada envío introducido en la línea, la secuencia de bombeo en cada fuente de suministro, así como los tiempos de inicio y finalización de las operaciones de carga y descarga de material. La programación de tareas en sistemas de transporte con múltiples nodos-fuente involucra nuevos desafíos que el enfoque continuo maneja con solvencia.

Las corridas de inyección ejecutadas en estaciones intermedias pueden insertar un nuevo lote o incrementar el tamaño de algún otro “batch” que transita por la tubería desde una fuente aguas arriba. Asimismo, los envíos transportados a través del sistema no necesariamente se disponen según un orden cronológico. Un lote de combustible puede ser precedido por otro en el tren de envíos, aunque este último haya sido inyectado con posterioridad. Para sortear este inconveniente, todo lote que se planea inyectar desde una fuente intermedia es reservado por el modelo como una entidad vacía (con dimensión

nula) hasta el instante en que arriba a la estación de carga donde se inicia su traslado. No obstante, el modelo asume que en todo momento, solo puede desarrollarse una única operación de bombeo por vez. Más aún, el enfoque presentado en el capítulo previo se limita a redes de poliductos con flujo unidireccional, en las cuales cada par de nodos está interconectado por una única tubería.

A lo largo de este capítulo se desarrollará una formulación MILP más avanzada, que permitirá resolver la planeación operacional de redes de poliductos unidireccionales, coordinando la inyección y descarga simultánea de productos en múltiples nodos del sistema. A diferencia del enfoque propuesto en el capítulo previo, la impulsión de los lotes podrá ejecutarse en simultáneo, desde las diferentes terminales de suministro que abastecen a la red. De este modo, el tiempo total requerido para satisfacer las necesidades de combustibles en los centros de distribución se reduce de manera significativa, facilitando el uso intensivo de la capacidad de transporte de la red. No obstante, tal como remarcaran Moura y colab. (2008), existen operaciones de bombeo conflictivas, que no pueden solaparse en el tiempo. A ese fin, se introducirán las denominadas “condiciones de compatibilidad de las corridas de bombeo” que conferirán al modelo la capacidad de evitar la superposición de inyecciones incompatibles. Hacia el final del capítulo se resuelven dos ejemplos característicos, los cuales permiten demostrar que la nueva formulación MILP proporciona programas de transporte mucho más eficientes, en tiempos computacionales razonables. En particular, en el segundo caso de estudio, se aborda por primera vez la programación de operaciones de transporte en la red argentina de poliductos.

VI.2 Ejemplo Motivante

Consideremos un ejemplo real que involucra una parte de la red de abastecimiento de combustibles del Brasil, estudiada por Boschetto y colab. (2008). Como se ilustra en la Figura VI.1, el sistema cuenta con cuatro poliductos unidireccionales identificados por los números 4, 8, 12 y 14, que conectan cuatro pares de nodos adyacentes: $N3-N2$, $N2-N5$, $N5-N8$, y $N8-N7$, en ese orden.

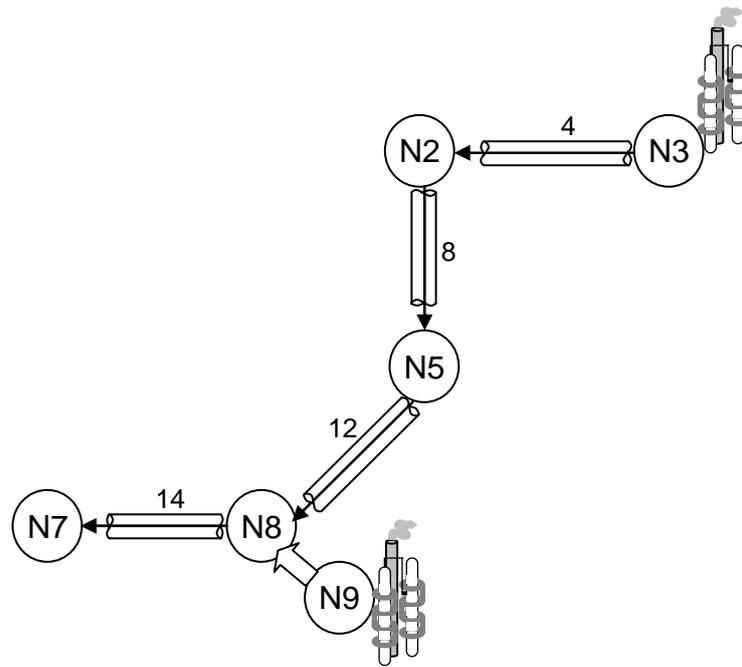


Figura VI.1. Red de Suministro de Combustibles por Poliductos

El nodo $N3$ representa una destilería de petróleo que provee de un importante número de productos líquidos refinados, mientras que los centros $N2$ y $N5$ constituyen terminales duales, de ingreso y egreso de combustibles a la línea. Estas últimas pueden introducir material en el poliducto con el objetivo de atender requerimientos en destinos ulteriores, o coleccionar lotes provenientes de ductos adyacentes (aguas arriba del sistema) almacenándolos temporalmente en tanques destinados a cada especie. Una tercera alternativa es la transferencia directa de “batches” de un poliducto a otro (“tightlining”) sin la intervención del depósito intermedio. Tal es el caso del movimiento de lotes desde la sección de egreso del poliducto # 4 ($N3-N2$) hacia el origen de la tubería # 8 ($N2-N5$). Por último, la terminal $N8$ colecciona las partidas de producción provenientes desde una refinería cercana, situada en el nodo $N9$, para enviarlas a través del poliducto # 14 hacia el destino final $N7$, donde se concentra una parte importante de la demanda de la región. Asimismo, el nodo $N8$ puede ser el destinatario de “batches” de productos provenientes de estaciones aguas arriba del trayecto.

El sistema de transmisión por tuberías ilustrado en la Figura VI.1 puede interpretarse como una red de ductos troncales, con múltiples puntos de ingreso y egreso de combustibles (ver Figura VI.2). Ciertas terminales logísticas presentan un propósito dual, pudiendo ejecutar tanto operaciones

de inyección como de recepción de lotes. Supongamos que la disposición inicial de envíos dentro del sistema comprende un total de cuatro lotes ($B5$, $B4$, $B3$ y $B1$) conteniendo los productos $P2$, $P1$, $P3$ y $P4$, respectivamente. Existe además un lote vacío ($B2$) situado en la interfase $B3$ - $B1$, que se ha reservado para la inserción de combustible $P1$ desde el nodo intermedio $N8$. La incorporación de lotes que se desplazan vacíos hasta su punto de inserción se ha discutido en detalle a lo largo del Capítulo V.

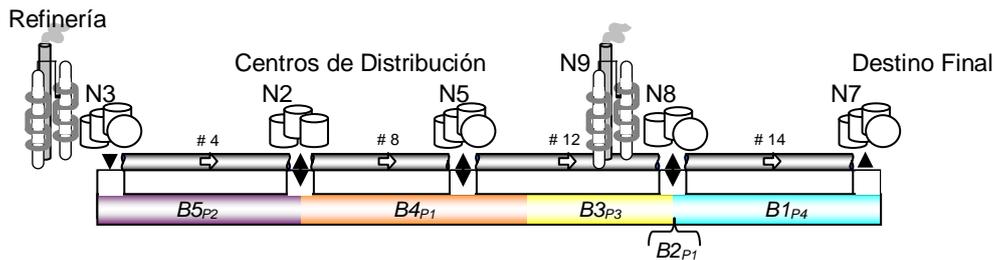


Figura VI.2. Condición Inicial de los Lotes en la Red de Ductos

El operador del sistema ha sido instruido para proveer de combustible $P1$ al nodo $N5$ con material proveniente del “batch” $B4$, al tiempo que debe atender los requerimientos de combustible $P4$ en el destino $N7$ con material contenido en el lote $B1$. Para lograrlo, planea ejecutar dos campañas de inyección de combustibles, en los nodos $N3$ y $N8$. Como existe un stock inicial de producto $P2$ en tanques de la refinería $N3$, el operador planea incorporar un volumen adicional de $P2$ en el “batch” preexistente $B5$, entregando, en forma simultánea, el combustible $P1$ demandado por el nodo $N5$. Análogamente, buscará insertar el nuevo lote $B2$ con producto $P1$ disponible en tanques del centro $N8$, transfiriendo al mismo tiempo parte del lote $B1$ hacia el nodo $N7$. Supondremos que ambas operaciones se desarrollan a un mismo caudal de transporte, y que las cantidades de $P1$ y $P4$ demandadas por las terminales $N5$ y $N7$ son equivalentes. Si las operaciones de bombeo debieran desarrollarse en forma secuencial (esto es, una a continuación de la otra) el operador impulsaría primero el combustible $P2$ dentro del “batch” $B5$ en la terminal $N3$, para entregar $P1$ al destino $N5$ (Operación (A) en la Figura VI.3) y luego introduciría producto $P1$ en la terminal $N8$ para abastecer con $P4$ al destino $N7$ (Operación (B) en la Figura VI.3).

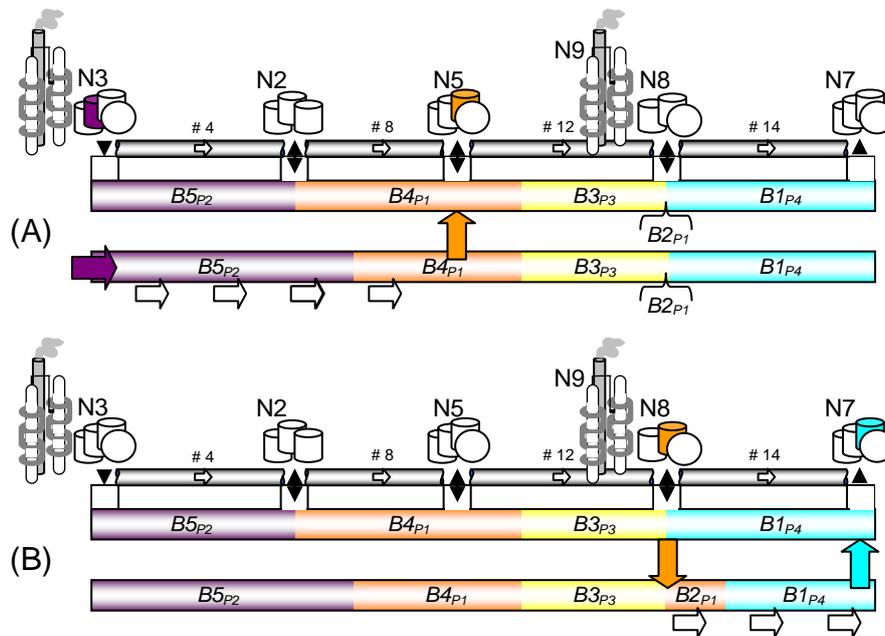


Figura VI.3. Plan de Bombeo Secuencial con Inyecciones Sucesivas de Lotes en los Nodos N3 y N8

En el diagrama de la Figura VI.4, ambas inyecciones (A y B) y las derivaciones prescritas se ejecutan en simultáneo. La actividad del sistema se confina a dos tramos de tubería aislados: los ductos 4 y 8, por un lado, y el ducto 14 por el otro. Ambos tramos de la red están separados por la línea 12, que permanece inactiva.

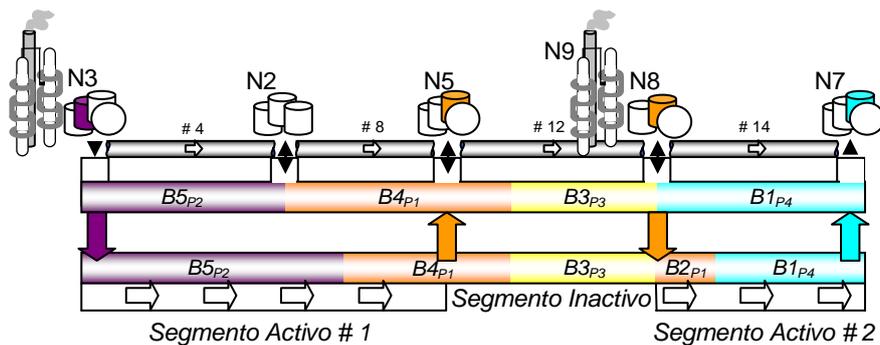


Figura VI.4. Corridas Simultáneas de Inyección en las Terminales de Ingreso N3 y N8

Cada tramo activo recibe material desde una única fuente: N3-N5 desde el nodo N3, y N8-N7 desde N8. Además, el material que fluye a lo largo del tramo N3-N5 no atraviesa la coordenada del centro N8. Esto último representaría una operación incompatible, pues al mismo tiempo, se bombea

desde el propio nodo *N8* material almacenado en sus tanques. Como resultado, el “batch” *B1* se desplaza hacia el destino *N7* sólo a causa de la impulsión del lote *B2* en el centro *N8*. Dicho de otro modo, la inyección de *B2* en *N8* determina el caudal de transporte a lo largo del poliducto *14*. Se dice que no existe interferencia entre las corridas de bombeo, y ambas inyecciones constituyen ejecuciones compatibles. Más aún, al realizarse ambas corridas de bombeo en simultáneo, el tiempo requerido para completarlas se reduce a la mitad.

VI.3 Hipótesis del Modelo

En el desarrollo del primer modelo continuo de representación de redes de poliductos que operan de manera coordinada, es necesario adoptar una serie de hipótesis de trabajo que rigen el funcionamiento de los sistemas bajo análisis.

- (1) Se estudia una red de poliductos simples que transportan múltiples combustibles refinados.
- (2) Los nodos logísticos que constituyen la red de abastecimiento están interconectados por poliductos unidireccionales.
- (3) Existe a lo sumo una única tubería conectando cada par de nodos en la red.
- (4) En todo momento, los poliductos permanecen completamente llenos de combustibles líquidos incompresibles.
- (5) Todo par de envíos consecutivos se moviliza a través de las tuberías sin dispositivos físicos de separación.
- (6) El material de interfase o “transmix” entre dos envíos adyacentes representa una pérdida conocida, independiente del caudal de transporte y de la distancia recorrida.
- (7) La inyección simultánea de “batches” en diferentes terminales de ingreso es una operación permitida.
- (8) Durante una corrida de bombeo, un poliducto puede recibir material desde otra línea adyacente, o bien desde la granja de tanques ubicada en el origen de la tubería, pero no ambas cosas al mismo tiempo.

- (9) Las demandas de productos en las terminales de recepción son datos determinísticos, y deben recibirse en tanques de cada destino antes de la finalización del horizonte.
- (10) La disponibilidad de productos en las terminales de ingreso y recepción, así como la disposición inicial de envíos dentro de las tuberías, es información conocida.
- (11) El caudal de inyección puede modificarse de acuerdo a la fuente de suministro desde donde se abastecen los combustibles, y debe mantenerse dentro de un rango de valores dado.

VI.4 Formulación Matemática

Al igual que en el modelo de optimización presentado en el capítulo previo, la nueva propuesta para la planeación del transporte de combustibles en redes de poliductos con fuentes de suministro que operan en forma coordinada involucra cinco conjuntos principales: los bloques de ejecuciones o corridas de inyección (K), los lotes o “batches” (J), los productos transportados (P), las fuentes o nodos de ingreso (S), y las terminales de recepción y distribución (J). En sistemas de transporte que presentan una única fuente de aprovisionamiento en el origen de la tubería, la secuencia de ejecuciones de bombeo y el ordenamiento de los nuevos lotes que se desplazan dentro del conducto son estrictamente similares. Por lo tanto, existe una relación uno-a-uno entre corridas de bombeo y nuevos “batches” introducidos, y un mismo conjunto I^{new} se utiliza inequívocamente para representar a ambos elementos del modelo. Sin embargo, al incorporar nodos intermedios de inyección de productos, tal coincidencia entre el orden de las ejecuciones y los envíos se pierde, y ambos conjuntos K e I deben manejarse como entidades independientes. Además, el modelo de programación de poliductos con múltiples puntos de ingreso incorpora el conjunto S para identificar la fuente de suministro desde donde se inyectan los envíos de combustibles. En síntesis, estas formulaciones incluyen dos conjuntos adicionales respecto de los poliductos simples: K y S .

No obstante, en caso coordinar la actividad simultánea de más de una estación de ingreso, los elementos del conjunto K difieren sensiblemente de aquéllos utilizados en el modelo del Capítulo V. Para representar operaciones simultáneas de inyección, cada elemento del conjunto K involucra ahora un

bloque de corridas paralelas iniciadas en diferentes fuentes de suministro, en lugar de una simple inyección. Las corridas paralelas (dentro de un mismo bloque) no necesariamente comienzan y culminan al mismo tiempo. Sin embargo, cualquier inyección dentro del bloque k sólo puede iniciarse una vez que se haya completado el bloque de corridas previo ($k - 1$). Se dice que un bloque culmina una vez que todas las inyecciones involucradas en el mismo han concluido. Por ende, la extensión del bloque k es el tiempo que transcurre entre el inicio más temprano y la finalización más tardía de aquellas ejecuciones asociadas a k . En general, antes de resolver el problema, se desconoce el número preciso de ejecuciones y lotes a inyectar a lo largo del programa, y los valores de $|K|$ e $|I|$ deben adoptarse en forma arbitraria. La idea básica es reducir el tamaño de los conjuntos para acotar las dimensiones del modelo, procurando disponer del número mínimo de elementos necesarios para alcanzar la solución óptima del problema. Como ciertas corridas de bombeo pueden introducir material adicional en lotes preexistentes, el número de inyecciones normalmente excede al número de “batches” transportados. En la Sección 4.1 se presenta una expresión sencilla para estimar la cardinalidad del conjunto K . Los mejores valores dependen del número de productos transportados, la dimensión de los lotes y la extensión del horizonte temporal abordado.

VI.4.1 Restricciones para el Ordenamiento de las Corridas de Bombeo

El módulo de restricciones vinculadas al ordenamiento de las corridas de bombeo en el tiempo persigue los siguientes objetivos: (1) secuenciar los bloques de ejecuciones paralelas, (2) identificar los lotes a inyectar en el sistema, (3) dimensionar las corridas de inyección, y (4) establecer la duración del bloque en función de las ejecuciones que lo integran.

VI.4.1.a Secuenciación de Bloques de Corridas Paralelas

Un bloque de corridas de bombeo $k \in K$ puede iniciarse una vez completado el bloque de ejecuciones que lo precede en el tiempo ($k - 1$). Sea C_k la variable continua que denota el instante de culminación del bloque de ejecuciones k , y L_k su duración. Por consiguiente,

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall k \in K (k > 1) \quad (\text{VI.1})$$

Como la inyección simultánea de lotes es una operación permitida, el índice k representa, en el nuevo modelo, un subconjunto de ejecuciones que pueden

comenzar una vez concluidos los primeros $(k - 1)$ bloques de corridas en el horizonte de planeación actual. El evento C_k puede interpretarse como el tiempo al cual todas las corridas paralelas involucradas en el bloque k han sido completadas. Por simplicidad, los tiempos de transición entre bloques consecutivos suelen considerarse despreciables. No obstante, como se verá más adelante, la inclusión del término de transición o “changeover” es relativamente simple.

El número de corridas de bombeo que componen cada bloque es adoptado automáticamente por el modelo, teniendo en cuenta la condición de no-interferencia entre los flujos de ingreso de combustibles en distintos nodos-fuente (Hipótesis (8)). En el caso más sencillo, todo bloque de inyecciones paralelas involucra un único elemento, y el número de bloques y corridas de inyección es el mismo. Sin embargo, cada bloque de inyecciones puede involucrar hasta un máximo de $|S|$ elementos, donde $|S|$ es el número de nodos-fuente, cuando todas las refinerías comitentes impulsan sus productos en simultáneo en el poliducto. Sabido es que la cardinalidad del conjunto K debería ser suficientemente grande como para alcanzar el programa de operaciones óptimo. Si se compara con la formulación descrita en el capítulo anterior, el tamaño del conjunto K suele reducirse en este nuevo esquema, puesto que un número importante de bloques activos podrían incluir más de una ejecución paralela. Una regla general que muestra buenos resultados consiste en aplicar un factor $[2 / (|S| + 1)]$, menor que 1, al número de inyecciones propuestas en el modelo de inyecciones secuenciales presentado en el capítulo previo. Dicho de otro modo, se puede suponer inicialmente que:

$$|K| = \left\lceil \frac{2}{|S| + 1} \sum_{p \in P} \left(\frac{2}{Q_{\min,p} + Q_{\max,p}} \sum_{j \in J} DL_{p,j} \right) \right\rceil$$

donde $(Q_{\min,p}, Q_{\max,p})$ son los tamaños mínimo y máximo admisibles para las inyecciones de combustible p en cualquiera de las terminales de ingreso, y $DL_{p,j}$ representa el volumen de producto p requerido por el centro de recepción j a lo largo del horizonte.

Si h_{\max} simboliza la extensión del horizonte de programación, la culminación de todo bloque de ejecuciones paralelas debería ocurrir antes del tiempo h_{\max} .

$$C_k \leq h_{\max} \quad \forall k \in K \tag{VI.2}$$

VI.4.1.b Asignación de Lotes a Corridas de Bombeo Individuales

Una corrida de bombeo individual está caracterizada por el bloque de ejecuciones $k \in K$ al que pertenece, y la terminal de inyección $s \in S$ donde se desarrolla. En otras palabras, toda corrida individual queda determinada por el par ordenado (k, s) . Si bien se permiten bloques con múltiples inyecciones simultáneas en más de un nodo, los ingresos de material en una dada terminal deben ejecutarse de a uno por vez. Se introduce la variable binaria $w_{i,s}^{(k)}$ para indicar que una corrida de bombeo asociada al bloque k tiene lugar en la terminal de ingreso s , e inyecta un nuevo lote de combustible $i \in I^{new}$ (o una cantidad adicional de producto al “batch” preexistente $i \in I$, en tránsito por la tubería) toda vez que $w_{i,s}^{(k)} = 1$. Como las inyecciones de material en un nodo-fuente s deben ejecutarse una por una, se pide que,

$$\sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} \leq 1 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (VI.3)$$

Es decir, como máximo una de las corridas del bloque k puede ejecutarse en la terminal de ingreso s .

Si todas las variables $w_{i,s}^{(k)}$ vinculadas al par (k, s) son iguales a cero, puede asegurarse que no existe inyección de material en la terminal s durante el intervalo $[C_k - L_k; C_k]$, y el nodo de suministro permanece inactivo. Más aún, si la sumatoria $(\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)})$ es nula en el óptimo, el bloque de inyecciones

paralelas k nunca se ejecuta. Se trata de un bloque “ficticio”. En tales circunstancias, los bloques subsiguientes $(k + 1)$, $(k + 2)$, ... también deben considerarse ficticios. El objetivo que se persigue es reducir el espacio de búsqueda de soluciones, evitando programas alternativos “simétricos” que intercalan bloques ficticios en diferentes posiciones de la secuencia pero representan la misma solución. Esta condición se impone a través de la Ecuación (VI.4).

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} \leq |S| \left(\sum_{s' \in S} \sum_{i' \in I} w_{i',s'}^{(k-1)} \right) \quad \forall k \in K (k > 1) \quad (VI.4)$$

En este caso, la cardinalidad del conjunto de nodos-fuente $|S|$ representa una cota superior para el número de elementos que pueden incluirse en cada bloque de inyecciones k .

VI.4.1.c Dimensionamiento de las Inyecciones

Sea $Q_{i,s}^{(k)}$ el volumen de combustible del lote i inyectado a través de la corrida de bombeo (k, s) . Dicha inyección puede constituir un nuevo envío en la línea, o incorporar un volumen adicional al lote i que transita desde nodos aguas arriba. La variable continua $Q_{i,s}^{(k)}$ será positiva sólo si el bloque de ejecuciones k efectivamente se desarrolla, y un volumen de combustible se introduce en el “batch” i (nuevo o preexistente) desde la terminal s ($w_{i,s}^{(k)} = 1$) a lo largo del intervalo $[C_k - L_k; C_k]$. Por lo tanto,

$$Q_{\min,s} w_{i,s}^{(k)} \leq Q_{i,s}^{(k)} \leq Q_{\max,s} w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (\text{VI.5})$$

En esta expresión, los parámetros $Q_{\min,s}$ y $Q_{\max,s}$ restringen el volumen de las inyecciones en cada fuente de suministro a un valor finito, entre un mínimo y un máximo. En toda corrida de bombeo, el producto inyectado se transportará en un único lote nuevo o preexistente (Ec. (VI.3)). En consecuencia, el volumen introducido en la corrida (k, s) estará dado por: $\sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)}$.

VI.4.1.d Duración de los Bloques de Corridas de Bombeo

Si $L_{k,s}$ simboliza la duración de la corrida de bombeo individual (k, s) , luego,

$$vb_{\min,s} L_{k,s} \leq \sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)} \leq vb_{\max,s} L_{k,s} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (\text{VI.6})$$

El intervalo $[vb_{\min,s}; vb_{\max,s}]$ representa el rango de caudales permitidos para las inyecciones de combustible desde el nodo-fuente s . En caso que durante el bloque de ejecuciones k la terminal de ingreso s permanezca inactiva ($w_{i,s}^{(k)} = 0$) de acuerdo con la Ecuación (VI.5) el volumen inyectado será nulo, mientras que la expresión (VI.6) hará $L_{k,s} = 0$.

Por otra parte, ninguna de las corridas de impulsión correspondientes al bloque $(k + 1)$ podría iniciarse antes de completar todas las ejecuciones individuales incluidas en el bloque k . Dicho en otras palabras, la duración del bloque k estará dado por: $L_k = \max_{s \in S} (L_{k,s})$, de modo que:

$$L_k \geq L_{k,s} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (\text{VI.7})$$

Para cada bloque de ejecuciones k , la inyección más extensa entre todas las terminales activas determina su duración. Asimismo, es posible contemplar aquí los tiempos de transición entre dos corridas consecutivas ejecutadas en

la misma terminal de ingreso. Si φ_s representa el tiempo que insumen las operaciones de transición entre dos inyecciones consecutivas que se ejecutan en el mismo nodo-fuente s , la duración del bloque k estará dado por:

$$L_k \geq L_{k,s} + \varphi_s \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k-1)} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (\text{VI.7})$$

Es importante notar que el último término correspondiente al tiempo de transición sólo se fuerza en caso que la terminal s haya permanecido activa durante el bloque de ejecuciones previas $(k - 1)$, esto es $\sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k-1)} = 1$. No

obstante, cuando la inyección individual (k, s) no determine la duración del bloque por ser menos extensa que sus pares, el tiempo de transición φ_s podría “enmascarse” aprovechando parte del tiempo ocioso de la terminal (ver caso (B) en Figura VI.5).

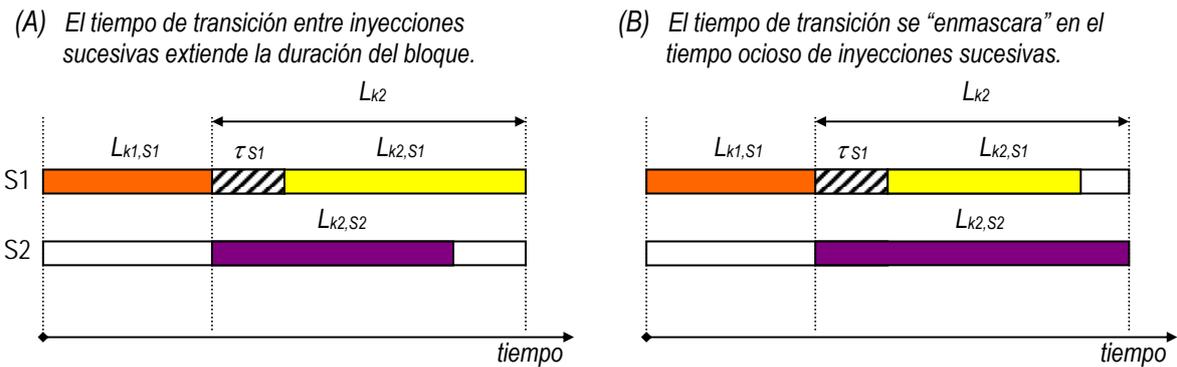


Figura VI.5. Diagrama de Gantt que Representa la Duración de un Bloque de Ejecuciones, Incluidos los Tiempos de Transición

VI.4.2 Restricciones para el Seguimiento de Lotes

Las restricciones de seguimiento o “tracking” permiten controlar la evolución del tamaño y la localización de los lotes en tránsito por el interior de los poliductos, a lo largo del horizonte de planeación. El cálculo de ambas propiedades dinámicas de los envíos al tiempo de finalización de todo bloque de corridas k se detalla a continuación:

VI.4.2.a Evolución del Tamaño de los Envíos en el Tiempo

Sea $W_{i,k}$ el volumen contenido por el “batch” i en el instante de culminación del bloque de corridas paralelas k , esto es, al tiempo C_k . En el

transcurso de las ejecuciones del bloque k , el tamaño de un “batch” i puede modificarse por dos motivos principales: (a) recibir un aporte adicional de combustible desde una estación intermedia de ingreso s , o (b) entregar parte de su contenido en derivaciones o “cortes” de producto hacia los destinos $j \in J$.

$$W_{i,k} = W_{i,k-1} + \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (\text{VI.8})$$

Como las tuberías solo admiten flujo unidireccional, es necesario verificar el correcto movimiento del material que ingresa al sistema en cualquier punto de acceso s . El volumen total introducido en las terminales s' previas a s impone una cota superior a la cantidad de producto que puede entregarse a los primeros destinos j ubicados aguas arriba de s . Dicho de otro modo, la diferencia entre lo inyectado y lo transferido desde/hacia las terminales aguas arriba del nodo-fuente s debe ser positiva (si el flujo de material avanza más allá del nodo s) o nula. En términos matemáticos,

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in J \\ \sigma_j \leq \tau_s}} D_{i,j}^{(k)} \leq \sum_{i \in I} \sum_{\substack{s' \in S \\ \tau_{s'} < \tau_s}} Q_{i,s'}^{(k)} \quad \forall s \in S, k \in K \quad (\text{VI.9})$$

Si el elemento i es un nuevo lote inyectado en la línea durante la ejecución del bloque k , entonces $W_{i,k-1}$ tomará un valor nulo. Por el contrario, $W_{i,k-1}$ adopta un valor positivo cuando el lote i transita por la tubería desde fuentes aguas arriba, en cuyo caso la variable $W_{i,k-1}$ representa el contenido total del lote i al tiempo de culminación del bloque previo ($t = C_{k-1}$). Si el lote i forma parte de la disposición inicial de envíos dentro del sistema a tiempo $t = 0$, el valor de esta variable cumple la condición $W_{i,k-1} = W_i^0$ para $k = 1$, donde W_i^0 indica el tamaño del “batch” i en el tren de lotes disponibles en el ducto al momento de programar las operaciones.

VI.4.2.b Seguimiento de la Ubicación de los Lotes en el Tiempo

Por su parte, la variable continua $F_{i,k}$ es la coordenada volumétrica superior del lote i en el instante de culminación del bloque k ($t = C_k$). La coordenada $F_{i,k}$ representa el volumen total de productos contenidos entre la primera fuente de aprovisionamiento u origen de la red de transporte, y el extremo más alejado del “batch” i , en el momento de completar todas las ejecuciones del bloque k . Es importante notar que el manejo de transferencias directas de combustibles entre tuberías adyacentes (“tightlining”) se resuelve de manera natural y efectiva. Al pasar de un poliducto a otro, la identidad del

“batch” se conserva, y la coordenada del envío se incrementa en forma correlativa. En otras palabras, $F_{i,k}$ describe la posición **absoluta** del mismo lote i en el sistema de tuberías respecto de su origen, evitando generar una nueva entidad al transferir material de un ducto al siguiente. Esta última es la opción recurrente de las representaciones discretas de redes de poliductos publicadas en la literatura hasta el momento.

A partir de la condición de continuidad del flujo de productos dentro de las tuberías, si la variable $F_{i+1,k}$ representa la coordenada superior del lote ($i + 1$) al tiempo de culminación del bloque k , su valor debe coincidir exactamente con la coordenada inferior del lote i que lo precede. Por lo tanto,

$$F_{i,k} - W_{i,k} = F_{i+1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (\text{VI.10})$$

Como los lotes se desplazan en un único sentido (dirección de coordenadas F crecientes) la ubicación del lote i al tiempo de culminación de dos bloques sucesivos ($k - 1$) y k debe verificar la siguiente condición:

$$F_{i,k-1} \leq F_{i,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (\text{VI.11})$$

Si PV representa el volumen total de la red de tuberías, la coordenada $F_{i,k}$ de un lote que transita por el sistema no puede superar este valor en ninguna instancia de inyección asociada a un bloque k .

$$F_{i,k} \leq PV \quad \forall i \in I, k \in K \quad (\text{VI.12})$$

Asimismo, la coordenada o extremo inferior de todo lote en tránsito debe ser no-negativa, verificando,

$$F_{i,k} - W_{i,k} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (\text{VI.13})$$

VI.4.3 Ecuaciones de Balance Global Alrededor de la Red de Poliductos

Una característica común de los sistemas de transporte de combustibles a través de poliductos es la necesidad de conservar llenas de material a todas las tuberías, en todo momento. En consecuencia, el volumen total ocupado por los “batches” que transitan por el interior del sistema debe ser exactamente igual al contenido total PV , en cualquier instante de tiempo; en particular, al tiempo de culminación del bloque k .

$$\sum_{i \in I} W_{i,k} = PV \quad \forall k \in K \quad (\text{VI.14})$$

Más aún, como todos los combustibles se transportan en estado líquido a presiones normales, puede suponerse un valor de densidad constante para cada uno de ellos. El volumen total transferido desde los lotes en tránsito hacia las terminales receptoras debe coincidir con el volumen inyectado en los ductos desde las fuentes de suministro activas, durante la ejecución del bloque k .

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (\text{VI.15})$$

La posibilidad de desarrollar impulsiones simultáneas podría hacer que más de una variable $Q_{i,s}^{(k)}$ adopte un valor positivo dentro de un mismo bloque de ejecuciones k . En tales circunstancias, dos o más fuentes de suministro del conjunto S inyectarán flujos de productos en paralelo, siempre y cuando se verifiquen las condiciones de no-interacción de flujos a lo largo de la línea, las cuales serán descritas en la Sección VI.4.5.

VI.4.4 Condiciones de Viabilidad para la Inyección y el Despacho de Lotes

Cuando alguna de las corridas de bombeo correspondientes al bloque k se ejecuta en una de las fuentes intermedias s , la representación propuesta supone que el material se incorpora a una entidad preexistente i . Si el lote i es efectivamente un nuevo elemento, el tamaño $W_{i,k-1}$ al inicio del bloque de corridas de bombeo k será nulo. Por el contrario, si el “batch” i corresponde a un envío ya existente, introducido en alguna terminal aguas arriba del trayecto, la variable $W_{i,k-1}$ será positiva y el volumen inyectado incrementará el tamaño de ese lote en tránsito.

VI.4.4.a Inyección de Combustibles en los Poliductos

Para recibir material proveniente de alguna fuente de suministro s en el transcurso del bloque de ejecuciones k , el lote receptor i debe satisfacer las siguientes condiciones de accesibilidad:

- a) Antes de iniciarse las operaciones de ingreso, el lote debe haber alcanzado la ubicación del nodo s (τ_s). Por ende, el valor de la variable $F_{i,k-1}$ no puede ser inferior que τ_s .

$$F_{i,k-1} \geq \tau_s \quad w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (\text{VI.16})$$

- b) Al comenzar el bloque de ejecuciones k , la coordenada inferior del “batch” i ($F_{i,k-1} - W_{i,k-1}$) no debe haber superado la ubicación del nodo s

(τ_s). Dicho de otro modo, el desarrollo de la corrida individual (k, s) exige que la diferencia $F_{i,k-1} - W_{i,k-1}$ no exceda el valor τ_s .

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \tau_s + (PV - \tau_s)(1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (\text{VI.17})$$

Analizando las Ecuaciones (VI.16) y (VI.17) se desprende que la condición $w_{i,s}^{(k)} = 1$ implica que $F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \tau_s \leq F_{i,k-1}$. Al mismo tiempo, un volumen de al menos $Q_{\min,s}$ unidades será impulsado desde el nodo s al lote i durante la ejecución del bloque k , de acuerdo con la Ec. (VI.5). En caso que el “batch” i represente un nuevo envío, entonces $W_{i,k-1} = 0$ y ambas condiciones de accesibilidad se simplifican a $F_{i,k-1} \leq \tau_s \leq F_{i,k-1}$, es decir $\tau_s = F_{i,k-1}$. Para disminuir el costo computacional de la solución del modelo, es posible incorporar una tolerancia muy pequeña ($\varepsilon > 0$) a las condiciones de ingreso de nuevos lotes en estaciones intermedias, para relajarlas del modo que sigue: $F_{i,k-1} - \varepsilon \leq \tau_s \leq F_{i,k-1} + \varepsilon$.

VI.4.4.b Derivación de Material hacia los Centros de Recepción

El despacho de material desde un lote en tránsito $i \in I$ hacia un destino $j \in J$ durante la ejecución de un bloque de corridas $k \in K$ sólo es factible en tanto y en cuanto el “batch” i pueda alcanzar la conexión física de descarga a la terminal de recepción j en el transcurso del bloque k . Esto último implica el cumplimiento de dos condiciones:

- a) En el momento de finalizar las operaciones de bombeo que componen el bloque k , la coordenada superior del “batch” i ($F_{i,k}$) debe haber alcanzado la ubicación del nodo receptor j (σ_j) de modo que $F_{i,k} \geq \sigma_j$.
- b) Al completarse las operaciones programadas en el bloque previo ($k - 1$), la coordenada inferior del lote no debe haber superado la localización σ_j del destino, verificando $F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \sigma_j$.

De nuevo, $x_{i,j}^{(k)}$ es la variable binaria que indica la concreción de una operación de corte o derivación del lote i hacia los tanques de almacenamiento de la terminal j durante la ejecución del bloque de corridas k (toda vez que $x_{i,j}^{(k)} = 1$). Caso contrario, cuando $x_{i,j}^{(k)} = 0$ no existe transferencia de material desde el “batch” i al destino j ($D_{i,j}^{(k)} = 0$) tal como lo establece la Ecuación (VI.18).

$$D_{\min} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq D_{\max} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (\text{VI.18})$$

En esta expresión, los parámetros D_{\min} y D_{\max} representan las cotas inferior y superior impuestas al volumen de combustible que puede derivarse desde cualquier lote a un dado destino, en el transcurso de cada bloque de corridas. Las Restricciones (VI.19) y (VI.20) resumen ambas condiciones de factibilidad para el despacho de combustibles desde los lotes en tránsito hacia los centros de recepción.

$$F_{i,k} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (\text{VI.19})$$

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \sigma_j + (PV - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (\text{VI.20})$$

Aún cuando la entrega de producto desde el lote i hacia la terminal de egreso j sea posible, podría ocurrir que el “batch” esté destinado a otros centros de recepción. En esos casos, la variable $x_{i,j}^{(k)}$ se anula para satisfacer la condición de entrega mínima planteada a través de la Ecuación (VI.18).

Un párrafo aparte merece la determinación del volumen máximo que puede entregarse desde un lote a los destinos del sistema, en función del grado de avance del envío dentro de las tuberías. Si un nuevo “batch” i' se inyecta en la red de poliductos al ejecutar el bloque de corridas k , y las coordenadas de otro lote i ($i < i'$) al tiempo de finalización de los bloques sucesivos $(k - 1)$ y k satisfacen las condiciones: $F_{i,k-1} - W_{i,k-1} < \sigma_j \leq F_{i,k}$, es posible imponer una cota máxima al volumen entregado al destino j en el transcurso del bloque k , a partir de la diferencia $[\sigma_j - (F_{i,k-1} - W_{i,k-1})]$. Basado en la condición de flujo unidireccional, este resultado representa la fracción de lote i que aún permanece aguas arriba del destino j al iniciarse el bloque k . Sin embargo, podría presentarse una situación distinta si durante la ejecución del bloque k se buscara incrementar el contenido del propio lote i , que ya transita por la línea. En otras palabras, es posible que en el transcurso de la corrida de bombeo individual (k, s) ocurra la incorporación de una cantidad adicional de producto al “batch” i ($Q_{i,s}^{(k)} > 0$) y otra porción del propio lote i se derive en simultáneo hacia destinos ulteriores. Resumiendo, el volumen máximo que puede entregarse desde el lote i hacia las primeras “ j ” terminales de egreso viene dado por,

$$\sum_{j'=1}^j D_{i,j'}^{(k)} \leq \sigma_j - (F_{i,k-1} - W_{i,k-1}) + \sum_{\substack{s \in S \\ \tau_s < \sigma_j}} Q_{i,s}^{(k)} + (PV - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad (\text{VI.21})$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K$$

VI.4.5 Condiciones de Corridas de Bombeo Compatibles

A diferencia de todos los modelos presentados a lo largo de capítulos previos, cuando existe la posibilidad de ejecutar corridas simultáneas de inyección de combustibles en más de una terminal de ingreso, una condición importante debe incorporarse a la formulación del problema. El objetivo principal es evitar la interferencia entre los flujos de material originados por las corridas de bombeo que se desarrollan en paralelo. Si un poliducto o tramo de la red permanece activo durante la ejecución del bloque k , el movimiento de los productos a lo largo de ese tramo debería ser motivado por una única impulsión: (i) la inyección de combustible contenido en los tanques de la terminal s ubicada en la sección de ingreso a ese tramo, o (ii) la transferencia directa de material desde otro poliducto adyacente que lo alimenta. Si el movimiento es inducido por la inyección individual (k, s) en la sección de ingreso de la línea, no puede existir flujo de material transferido desde otro poliducto activo “aguas arriba”. Recíprocamente, ningún lote puede inyectarse en la terminal intermedia s mientras la tubería está recibiendo material por medio de una transferencia directa desde estaciones aguas arriba de s . Por cuestiones operativas, los efectos combinados de impulsión están prohibidos. La ejecución de “ n ” corridas simultáneas de bombeo debe confinarse a un número equivalente de segmentos de tubería activos aislados entre sí, sin transferencias de productos entre esos segmentos activos.

La Figura VI.6 ilustra un ejemplo sencillo que involucra un par de corridas de bombeo simultáneas e incompatibles entre sí. El plan de transporte incluye dos inyecciones paralelas dadas por: (a) el agregado de producto $P2$ al “batch” $B5$ desde el nodo-fuente $N3$, y (b) la incorporación de combustible $P1$ en el lote preexistente $B4$ en la terminal de ingreso $N5$. Durante la ejecución de este bloque de corridas simultáneas, el programa de entregas desde la línea especifica dos derivaciones parciales de productos: (a’) $P3$ desde el “batch” $B3$ hacia el destino $N8$, y (b’) $P4$ desde el lote $B1$ hacia la terminal $N7$. La incompatibilidad entre ambas corridas se produce a raíz de la inyección de material en el lote $B4$ desde la estación intermedia $N5$, cuando el propio “batch” $B4$ está siendo empujado por su sucesor $B5$ debido a la corrida simultánea desde una fuente aguas arriba ($N3$). En síntesis, se observa un efecto combinado de impulsión en la sección de ingreso al poliducto # 12 (nodo $N5$).

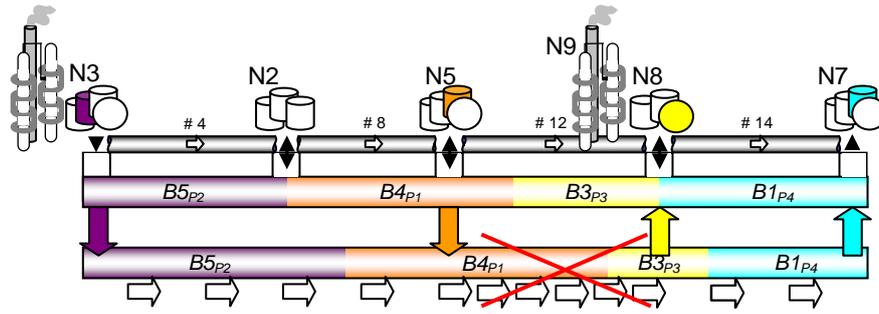


Figura VI.6. Inyecciones Simultáneas Incompatibles

Para evitar la aparición de corridas incompatibles en el plan de transporte óptimo, la nueva Restricción (VI.22) se incorpora al modelo.

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in J \\ \sigma_j \leq \tau_s}} D_{i,j}^{(k)} \geq \sum_{\substack{i \in I \\ \tau_{s'} < \tau_s}} \sum_{s' \in S} Q_{i,s'}^{(k)} - Q_{\max} (1 - \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall s \in S, k \in K \quad (\text{VI.22})$$

La Ecuación (VI.22) establece que toda inyección individual (k, s) podría ejecutarse ($\sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} = 1$) siempre y cuando no exista un flujo de combustibles proveniente de tuberías adyacentes, aguas arriba de la estación de ingreso s . En otras palabras, el volumen total transferido desde los “batches” en tránsito hacia las terminales anteriores, con coordenadas $\sigma_j \leq \tau_s$ (lado izquierdo de la Ec. (VI.22)), no debe ser menor que el volumen total inyectado desde fuentes de ingreso s' ubicadas aguas arriba de la terminal s en la red. Combinando esta última expresión con la Ec. (VI.9) que fija una cota máxima a las derivaciones, es posible asegurar que cuando una terminal de inyección s se activa, el balance de ingreso y egreso de material se cumple como una igualdad estricta en las tuberías aguas arriba de s . Esta condición se impone a través de la Restricción (VI.22) sólo en caso que $\sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} = 1$.

En general, puede plantearse una condición alternativa más simple, que evita una parte importante de las incompatibilidades más comunes. Si un lote que recibe material en una estación intermedia no es afectado por el flujo de productos en tuberías aguas arriba, la coordenada inferior del envío permanece inalterable durante la ejecución del bloque. Dicho de otro modo, cuando $w_{i,s}^{(k)} = 1$, el lote i incorpora material desde la fuente s en el transcurso del bloque k , y su coordenada inferior no debe modificarse. En consecuencia, la propiedad de no-interacción entre corridas simultáneas se simplifica a:

$$F_{i+1,k} \leq F_{i+1,k-1} + PV (1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S (s > 1), k \in K \quad (VI.23)$$

Retomando el par de corridas ilustrado en la Figura VI.6, puede notarse que dicho par no satisface esta última condición, puesto que la coordenada inferior del lote receptor $B4$ avanza en su recorrido durante la ejecución de ambas inyecciones. No obstante, la Ec. (VI.23) es menos restrictiva que la Ec. (VI.22). Existen casos particulares en los cuales la Restricción (VI.23) erróneamente considera posible el desarrollo simultáneo de dos o más inyecciones incompatibles por definición. En otras palabras, la condición simplificada (VI.23) podría tolerar la ejecución simultánea de ciertas corridas de bombeo incompatibles.

Consideremos un caso sencillo que involucra la inyección simultánea de producto $P2$ dentro de un mismo lote $B5$, desde dos nodos de ingreso: $N3$ y $N2$ (ver Figura VI.7). La coordenada inferior del “batch” receptor $B5$ permanece en la misma posición durante el desarrollo de ambas corridas, en el extremo de origen del sistema de transporte (nodo $N3$). Sin embargo, existe un flujo de material proveniente del tramo $N3-N2$ que se transfiere en forma directa hacia el poliducto adyacente $N2-N5$, aún cuando el propio nodo $N2$ inyecta más combustible $P2$ en el mismo lote $B5$. La Ecuación (VI.22) evita esta posibilidad. Si el volumen inyectado en $N3$ no se retira en estaciones previas y atraviesa la coordenada del nodo $N2$, el ingreso en el propio centro $N2$ no puede activarse.

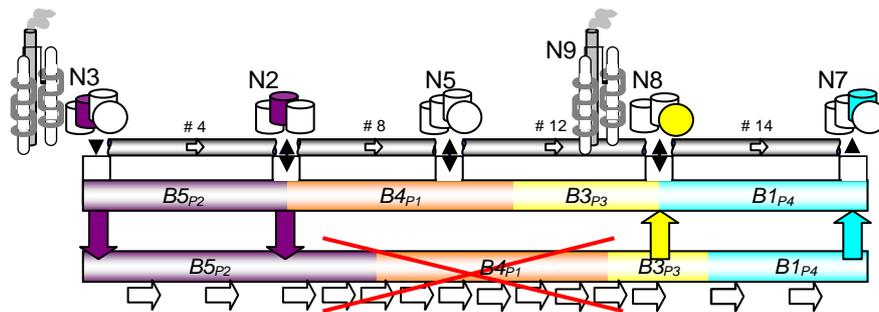


Figura VI.7. Inyecciones Incompatibles Dentro de un Mismo Lote

Para hacer que ambas condiciones sean equivalentes, es necesario considerar una restricción complementaria que impida la ejecución simultánea de corridas de bombeo incompatibles desde nodos-fuente diferentes, aún cuando las inyecciones se producen sobre un mismo lote de recepción.

$$\sum_{\substack{j \in J \\ \sigma_j \leq \tau_s}} D_{i,j}^{(k)} \geq \sum_{\substack{s' \in S \\ \tau_{s'} < \tau_s}} Q_{i,s'}^{(k)} - Q_{\max} (1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (\text{VI.24})$$

El sentido de esta expresión es similar al de la Ec. (VI.22), aunque mucho más simple. En efecto, la Restricción (VI.24) aplica sólo cuando las inyecciones y derivaciones desde/hacia los nodos aguas arriba se producen sobre un mismo lote. Utilizando el par de Ecuaciones (VI.23) y (VI.24) en lugar de la Restricción (VI.22), la formulación propuesta alcanza un desempeño computacional muy superior.

VI.4.6 Restricciones de Aprovisionamiento y Demanda de Combustibles

VI.4.6.a Asignación de Productos a “Batches”

Por definición, todo lote transportado en el ducto puede contener como máximo una única especie de combustible. Sea $y_{i,p}$ la variable binaria que toma un valor igual a 1 ($y_{i,p} = 1$) cuando el “batch” i transporta producto p . Por lo tanto,

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (\text{VI.25})$$

Si alguno de los elementos del conjunto I^{new} no tiene productos asignados en el programa óptimo ($y_{i,p} = 0, \forall p \in P$), el “batch” correspondiente nunca se introduce en la línea. En términos matemáticos, la condición $\sum_p y_{i,p} = 0$ implica que no existe corrida de inyección alguna que introduzca material en el lote i a lo largo del horizonte. En consecuencia, se dice que el “batch” i es una entidad ficticia, que satisface: $\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} w_{i,s}^{(k)} = 0$. Por el contrario, si el elemento i se ha asignado al transporte del producto p , existirá al menos una corrida de inyección que impulse combustible p dentro del lote i , desde alguna de las fuentes s que conforman la red. Estas condiciones pueden escribirse en términos matemáticos como sigue,

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} w_{i,s}^{(k)} \leq |S||K| \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (\text{VI.26})$$

A los efectos de reducir la región factible del problema, evitando soluciones redundantes pero sin excluir el programa de bombeo óptimo, los envíos ficticios se relegan al final de la secuencia de lotes a través de la siguiente restricción,

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} (i > 1) \quad (VI.27)$$

Por otra parte, ciertas secuencias de productos directamente se prohíben por generar un grado de contaminación inadmisibles. Supongamos que el par ordenado (p, p^*) representa una secuencia de productos no permitida. Luego,

$$y_{i-1,p} + y_{i,p^*} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} (i > 1), (p, p^*) \text{ incompatible} \quad (VI.28)$$

VI.4.6.b Cantidad de Producto p Inyectado desde un Nodo-Fuente

Si $y_{i,p} = 0$, el lote i no contiene producto p . Por el contrario, cuando $y_{i,p} = 1$, el lote i transporta producto p y el volumen de combustible p que ingresa en el “batch” i durante la ejecución de la corrida asociada (k, s) coincide con el volumen inyectado $Q_{i,s}^{(k)}$. Ambas condiciones se imponen a través de las Ecuaciones (VI.29) y (VI.30).

$$QP_{i,s,p}^{(k)} \leq Q_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K, p \in P \quad (VI.29)$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i,s,p}^{(k)} = Q_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (VI.30)$$

El parámetro $Q_{\max,p}$ establece la cantidad máxima de combustible p que puede inyectarse en un lote desde cualquiera de las estaciones de ingreso.

VI.4.6.c Volumen de Combustible p Derivado a Tanques de un Depósito

No puede despacharse combustible p desde el lote i a la terminal j si el “batch” i no contiene producto p . Sólo en caso que $y_{i,p} = 1$, el volumen de producto p transferido desde el lote i al destino j durante el bloque de corridas k estará dado por el valor de la variable $D_{i,j}^{(k)}$ en el óptimo. Su valor queda determinado por las Ecuaciones (VI.31) y (VI.32).

$$DP_{i,j,p}^{(k)} \leq D_{\max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P \quad (VI.31)$$

$$\sum_{p \in P} DP_{i,j,p}^{(k)} = D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (VI.32)$$

VI.4.6.d Disponibilidad de Combustibles en Cada Nodo-Fuente

El parámetro $SU_{p,s}$ representa la cantidad total de producto p disponible en tanques de la terminal de ingreso s , a ser inyectado en la línea a lo largo

del horizonte de planeación. Asimismo, $SL_{p,s}$ constituye una cota inferior para el volumen de combustible p que debe necesariamente enviarse desde la fuente s en el transcurso del plan. Este valor puede asociarse al volumen de los requerimientos a atender, y a la necesidad de liberar capacidad de almacenamiento en los tanques de las terminales de ingreso, para recibir nuevas campañas de producción provenientes de refinerías vecinas. Luego,

$$SL_{p,s} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} QP_{i,s,p}^{(k)} \leq SU_{p,s} \quad \forall p \in P, s \in S \quad (\text{VI.33})$$

VI.4.6.e Satisfacción de las Demandas de Combustibles en cada Destino

Por su parte, $DL_{p,j}$ es el volumen mínimo de producto p requerido por el centro de distribución j , a ser abastecido por medio de la red de poliductos durante el horizonte actual. Dado que la capacidad de almacenamiento en los depósitos es limitada, la cantidad total de producto p transferida desde la red de ductos a cada destino j a lo largo del plan no debería exceder el valor máximo admisible dado por $DU_{p,j}$. Por lo tanto, el volumen total de producto p descargado en la terminal j desde los envíos que contienen a la especie p se restringe a,

$$DL_{p,j} - B_{p,j} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} DP_{i,j,p}^{(k)} \leq DU_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J \quad (\text{VI.34})$$

Cuando la demanda de combustible p en el depósito j no pueda ser atendida antes de la finalización del horizonte, se generará una orden de retraso o “backorder” no nulo ($B_{p,j} > 0$), que deberá ser satisfecho en futuras instancias del plan. La incorporación de la variable continua $B_{p,j}$ en la Ecuación (VI.34) hace que el problema de programación de operaciones encuentre una solución factible a pesar de que algunas órdenes de aprovisionamiento queden incompletas al momento de finalizar el período de planeación.

VI.4.7 Condiciones Iniciales

W_i^o es un parámetro que representa el volumen de lote $i \in I^{old}$ disponible dentro del sistema de tuberías al momento de planificar las nuevas operaciones. Luego, la coordenada inicial del envío $i \in I^{old}$, producto de las operaciones de impulsión ejecutadas en el horizonte previo, se define a partir de la suma de los volúmenes de aquellos “batches” que suceden al lote i en el tren inicial de envíos ($i' \in I^{old}$, $i' > i$) más el propio volumen del “batch” i . En

términos matemáticos,

$$F_{i,k-1} = \sum_{\substack{i \geq i \\ i \in I^{old}}} W_i^o \quad \forall i \in I^{old}, \quad k=1 \quad (VI.35)$$

Más aún, se conoce de antemano el producto específico P_i transportado por cada uno de los lotes de partida $i \in I^{old}$. Por ende,

$$y_{i,p} = 1 \quad \text{para } p = P_i, \forall i \in I^{old} \quad (VI.36)$$

VI.4.8 Función Objetivo

La planeación de las operaciones de bombeo que se desarrollan al mismo tiempo en los diferentes poliductos que componen la red de transporte, busca maximizar el aprovechamiento de la capacidad instalada, cumpliendo en tiempo y forma con el despacho de los combustibles demandados. A partir de una coordinación efectiva, las operaciones de alimentación a la red y de distribución pueden completarse en un tiempo significativamente más corto. Por esta razón, se han seleccionado dos objetivos alternativos para la evaluación del programa. Estos son:

- (1) *El mínimo “makespan” (o tiempo total de operación)*, suponiendo un horizonte de duración variable, y fechas de entrega o “due-dates” no especificadas. Las operaciones de bombeo en los poliductos deberían completarse tan pronto como sea posible.

$$\text{Min } z = H \quad , \quad \text{sujeto a: } H \geq C_k \quad \forall k \in K \quad (VI.37)$$

- (2) *El mínimo costo total*, que incluye el costo de transición o reproceso de interfases, el costo de la energía eléctrica consumida en la operación de bombas (costo de bombeo) y la penalización por incumplimientos en la atención de la demanda. Para ello se supone que la extensión del horizonte y las fechas de entrega pactadas con cada terminal de recepción han sido establecidas de antemano. Esto es,

$$\text{Min } z = \sum_{i \in I} TC_i + \sum_{k \in K} PC_k + BC \quad (VI.38)$$

donde,

$$TC_i \geq \text{cif}_{p,p'} (y_{i,p} + y_{i+1,p'} - 1) \quad \forall i \in I; p, p' \in P \quad (VI.39)$$

$$PC_k = \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \text{cin}_{p,s} QP_{i,s,p}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (VI.40)$$

$$BC = \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} cb_{p,j} B_{p,j} \quad (\text{VI.41})$$

El parámetro $cif_{p,p'}$ es el costo atribuible a la degradación y/o reprocesamiento del volumen de interfase generado entre los combustibles p y p' ($p \neq p'$) que se transportan dentro de la tubería en “batches” consecutivos. Por su parte, el coeficiente $cin_{p,s}$ representa el costo energético de impulsión de una unidad volumétrica de combustible p introducida en la terminal de ingreso s , y $cb_{p,j}$ es la penalización por el incumplimiento en la atención de las demandas de combustible p en el destino j .

VI.5 Resultados y Discusión

VI.5.1 Ejemplo VI.1: Minimización del “Makespan”

El Ejemplo VI.1 comprende el mismo caso de estudio simple introducido por Jittamai en su tesis doctoral del año 2004, y reformulado en el Capítulo V del presente trabajo. El problema involucra la planeación operativa de corto plazo de un sistema de transporte por poliductos, consistente en una red sencilla compuesta por cuatro tuberías unidireccionales interconectadas que movilizan tres productos líquidos (A , B y C). El sistema cuenta con dos nodos de suministro (refinerías $S1$ y $S2$) y tres destinos o centros de distribución ($D1$, $D2$ y $D3$) donde se almacenan los combustibles antes de despacharse al mercado de cada región de influencia. El poliducto # 1 vincula la fuente $S1$ con el depósito $D1$, el ducto # 2 conecta al centro $D1$ con la refinería $S2$, y así sucesivamente, hasta alcanzar el destino más alejado del trayecto: $D3$ (ver primera línea de la Figura VI.8). Descartando las simplificaciones introducidas por Jittamai respecto de la operación de la línea en modo segregado, en este ejemplo se supone que ambas refinerías $S1$ y $S2$ proveen de todos los combustibles, pudiendo consolidarse envíos de un mismo producto en lotes comunes (modo fungible). En el caso de la fuente $S1$, los nuevos lotes de combustible se introducen en la sección de ingreso al poliducto # 1, mientras las inyecciones de material en el nodo intermedio $S2$ se producen en el origen del ducto # 3.

Las cantidades de productos disponibles en tanques de las fuentes de suministro, así como las demandas de combustibles a satisfacer desde la red en cada terminal de recepción se presentan en la Tabla VI.1. Por su parte, la Tabla VI.2 reporta los costos de transición atribuibles al reproceso de las

interfases entre pares de especies diferentes puestas en contacto. Por ejemplo, el volumen de interfase entre dos lotes de combustibles *A* y *B* insume un costo de recuperación de 2200 (US\$) siempre que el lote de *B* sea precedido por un lote de *A* (secuencia *A-B*). En el caso inverso (secuencia *B-A*), el costo se eleva a 2400 (US\$). Por último, los costos de impulsión dependientes del producto y la fuente de suministro se muestran en la Tabla VI.3. El caudal máximo de transporte se fija en 1,20 (unidades/h) para cualquier combustible, en todos los tramos de tubería.

Tabla VI.1. Disponibilidad y Demanda de Combustibles para el Ejemplo VI.1

	Disponibilidad [unidades]		Demanda [unidades]		
	Nodos de Ingreso		Destinos		
	S1	S2	D1	D2	D3
A	50	20	60	60	-
B	80	60	-	-	100
C	30	40	-	60	-

Tabla VI.2. Costos de las Interfases (en 10² US\$)

Predecesor	Sucesor		
	A	B	C
A	-	22,0	35,0
B	24,0	-	21,0
C	30,0	32,0	-

Tabla VI.3. Costo Unitario de Bombeo para Cada Producto en Ambas Refinerías

Producto (<i>p</i>)	Costos de Bombeo (10 ² US\$ por unidad de volumen)	
	Refinería	
	S1	S2
A	29,0	14,5
B	34,0	17,0
C	49,0	24,5

El contenido total de la red de poliductos acumula 80 unidades volumétricas, mientras la capacidad individual de cada tramo equivale a 20 unidades. La disposición inicial de envíos incluye una secuencia de cuatro lotes de productos refinados (*B5-B4-B2-B1*), tal como se ilustra en la parte superior de la Figura VI.8. Al igual que en el ejemplo planteado en el capítulo previo, se ha contemplado la posibilidad de insertar un nuevo lote *B3* en la interfase de los “batches” *B4* y *B2*. El intervalo de inyección del lote *B3* así como el volumen asignado al mismo constituyen decisiones inherentes a la resolución del modelo. Como se ha dicho, la red de tuberías opera en modo fungible o consolidado, y el tamaño de las inyecciones de cualquier producto en ambos nodos-fuente debe ajustarse a un rango de valores admisibles, que va de 10 a 40 unidades. No obstante, el volumen contenido por un lote que transita por la red de tuberías puede incrementarse a partir de la incorporación de material complementario provisto por las refinerías intermedias.

Tal como se ha señalado, una de las ventajas más importantes de la ejecución simultánea de corridas de bombeo compatibles es el mayor nivel de utilización del sistema de transporte en su conjunto, y la consecuente reducción de los tiempos requeridos para completar todos los despachos que especifica el plan (“makespan”). Basado en este concepto, se ha adoptado el mínimo costo total como objetivo principal del problema, y la minimización del “makespan” como segunda meta. Para ilustrar las mejoras que se obtienen al facilitar el desarrollo de múltiples impulsiones en paralelo, se ha resuelto el mismo ejemplo de aplicación utilizando ambas estrategias, esto es, con y sin la posibilidad de llevar a cabo inyecciones simultáneas en más de un nodo.

Programa de Inyecciones Secuenciales

Cuando las corridas de bombeo en las diferentes refinerías se ejecutan una a continuación de la otra, el modelo presentado en el capítulo previo provee el programa secuencial de operaciones que se ilustra en el diagrama de la Figura VI.8. Las dimensiones del modelo y los requerimientos computacionales del proceso de resolución se resumen en la Tabla VI.4. El mejor programa secuencial de operaciones para la red de tuberías se obtiene en 51,7 s de CPU, en un procesador múltiple Intel Core 2 Quad de 64 bits y 2,5 GHz, utilizando el algoritmo GAMS/GUROBI 1.0 como resolvidor MILP, y una tolerancia relativa de 1.10^{-3} como criterio de detención.

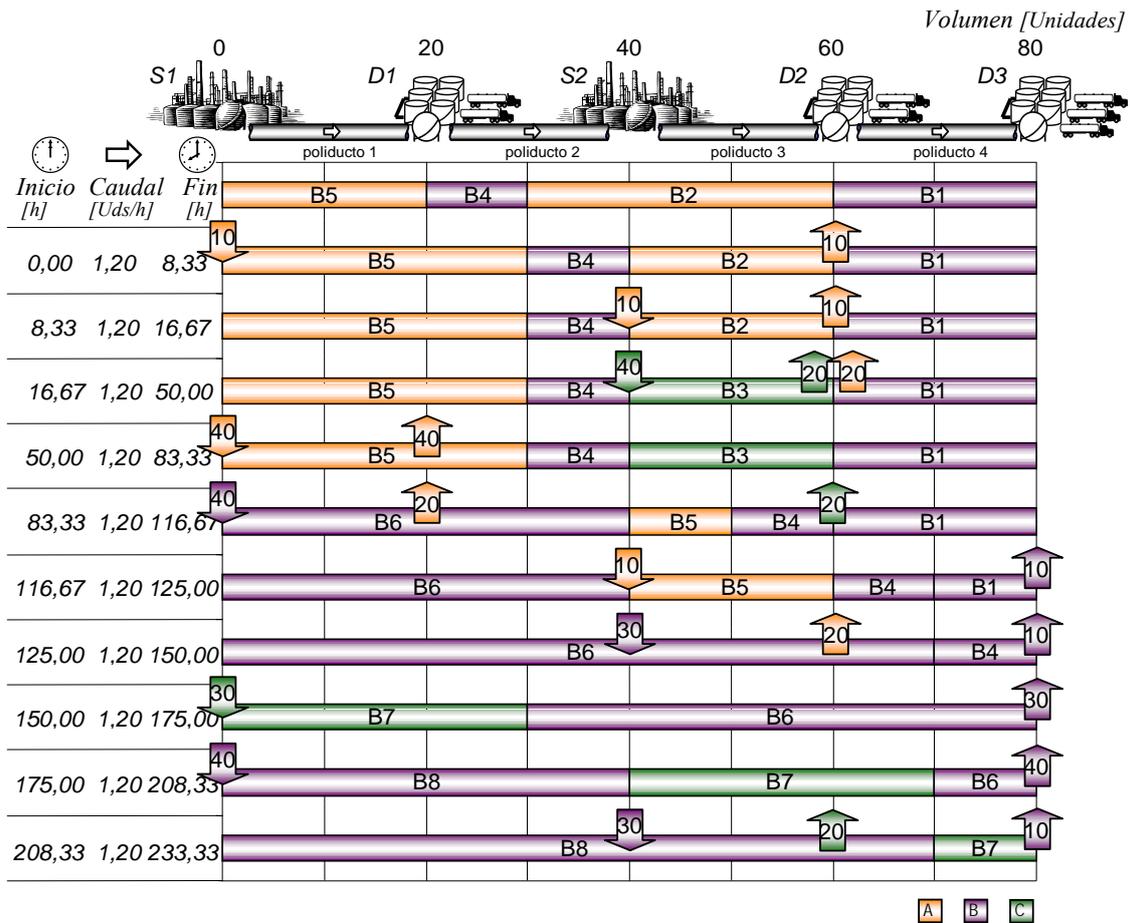


Figura VI.8. Programa Secuencial Óptimo para el Ejemplo VI.1

A los efectos de satisfacer el total de la demanda de combustibles en los centros de recepción, el plan de operaciones incluye un total de diez inyecciones ($k1-k10$), cinco en el nodo de origen $S1$ y las cinco restantes en la fuente intermedia $S2$ (ver Figura VI.8). El programa secuencial de envíos completa todas las operaciones en 233,33 horas.

Tabla VI.4. Estadísticas de los Modelos y Resultados Computacionales para el Ejemplo VI.1

Caso	Ec.	Var. Cont.	Var. Bin.	Tiempo de CPU (s)	Iter.	Costo óptimo (10^2 US\$)	Make-span	Costo de interfase (10^2 US\$)
Programa Secuencial	4091	2038	477	51,73	372538	8120,0	233,33	190,0
Programa Paralelo	3812	1856	432	275,32	5292702	8120,0	183,33	190,0

Sin embargo, es fácil notar que las corridas k_3 en S_2 y k_4 en S_1 podrían haberse desarrollado en simultáneo, sin que ello afecte los costos operativos del plan. Durante la ejecución k_3 , la fuente intermedia S_2 introduce el nuevo “batch” B_3 con 40 unidades de producto C , desde $t = 16,67$ h hasta $t = 50,00$ h. Al mismo tiempo, 20 unidades de A provenientes del lote B_2 , así como las 20 primeras unidades de C dentro del “batch” B_3 se extraen en el destino D_2 . Por consiguiente, sólo el poliducto # 3 permanece activo. De inmediato, la terminal S_1 retoma el control de las operaciones e incorpora 40 unidades adicionales de producto A en el “batch” B_5 a través de la corrida k_4 . La inyección de producto A en el origen del poliducto # 1 motiva el despacho de una cantidad equivalente de A desde el propio lote B_5 hacia el destino D_1 . En el transcurso de la ejecución k_4 , que tiene lugar entre las horas 50,00 h y 83,33 h, el poliducto # 1 es el único tramo activo de la red. En consecuencia, las corridas k_3 y k_4 poseen una duración similar de 33,33 h. Como el poliducto # 2, que separa las tuberías # 1 y 3, permanece inactivo durante el intervalo de acción de las instancias k_3 y k_4 , es claro que ambas inyecciones no interfieren entre sí, y pueden ejecutarse en paralelo. En efecto, el “makespan” podría reducirse al menos 33,33 h; esto es, de 233,33 h a 200,00 h. No obstante, el nuevo modelo de planeación de redes de poliductos coordinados descrito en el presente capítulo es capaz de alcanzar un programa de operaciones con “makespan” aún menor, sin alterar el costo total involucrado.

Programa de Inyecciones Paralelas en los Poliductos

El programa óptimo de envíos coordinados en los diferentes poliductos que conforman la red se obtiene a partir de resolver la nueva formulación MILP del problema, admitiendo inyecciones sincronizadas en más de un nodo-fuente. El plan de operaciones resultante se visualiza en la Figura VI.9. El mismo incluye siete inyecciones individuales (k_1 , k_2 , k_5 , k_6 , k_7 , k_8 y k_9) y un par de bloques de corridas simultáneas (k_3 , k_4).

Tal como se esperaba, las ejecuciones k_3 y k_4 del programa secuencial se combinan en un único bloque de corridas paralelas, ahora denominado k_3 , que abarca desde la hora $t = 25,00$ h hasta $t = 58,33$ h. Más aún, el programa presenta un bloque adicional de inyecciones simultáneas (k_4). En efecto, al finalizar las operaciones del bloque k_3 , el lote B_4 se ubica en una posición adecuada para recibir 40 unidades adicionales de producto B desde la fuente

intermedia S2. Al hacerlo, las 20 unidades restantes de combustible C contenidas en el lote B3 y otras 20 unidades de B en el “batch” B1 se derivan hacia los destinos D2 y D3, respectivamente. En el transcurso de estas operaciones, los poliductos # 3 y 4 permanecen activos. Al mismo tiempo, el programa prevé la inserción del nuevo lote B6 con 20 unidades de B en el nodo S1 para derivar 20 unidades de A desde el lote B5 al destino D1. De esta forma, el segundo movimiento de productos queda confinado exclusivamente a la tubería # 1. Como resultado, ambas impulsiones desde los nodos S1 y S2 no interfieren entre sí, ya que los segmentos activos # 1 y # (3 - 4) permanecen aislados por el tramo inactivo # 2. El bloque k4 se desarrolla desde la hora $t = 58,33$ h hasta $t = 91,67$ h, a pesar de que la corrida de inyección individual iniciada en S1 es más corta, y podría culminarse con anticipación. De este modo, es posible acortar en otras 16,67 h al tiempo total de operación.

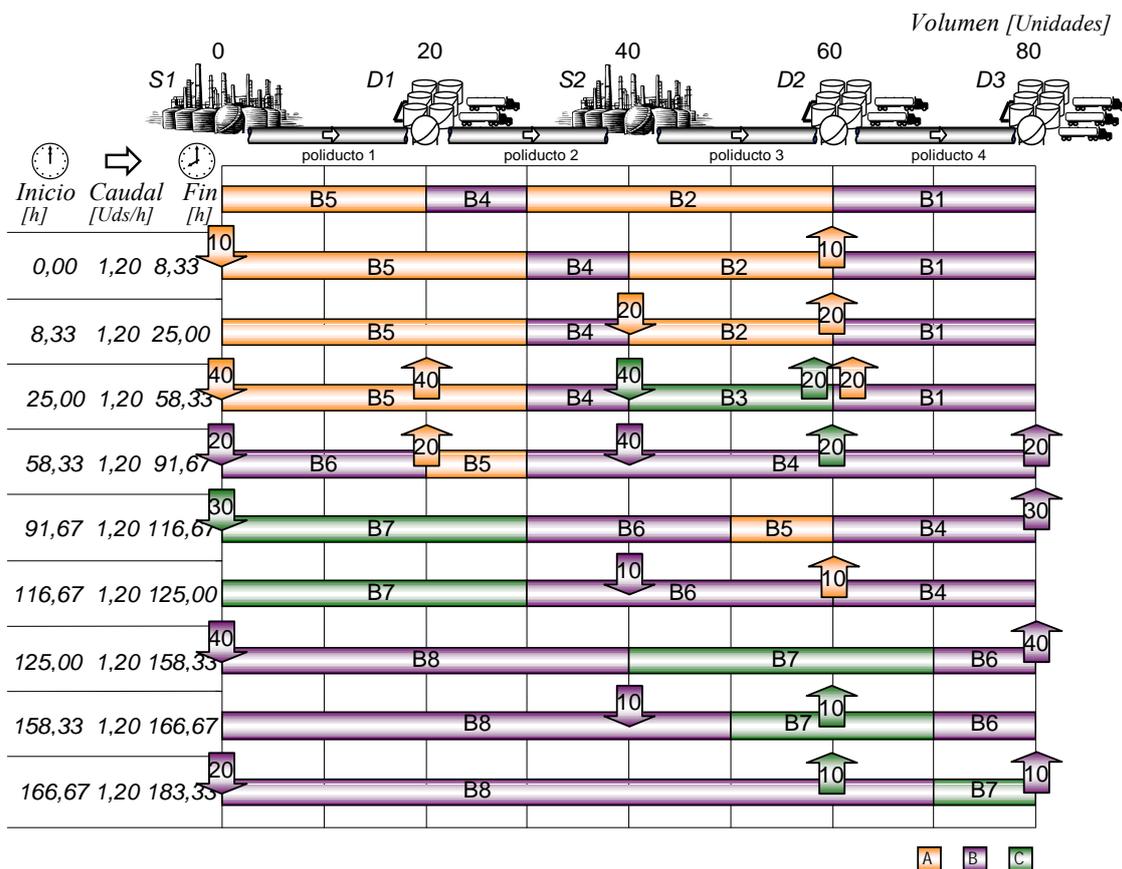


Figura VI.9. Programa Óptimo con Inyecciones Paralelas para el Ejemplo VI.1

Finalmente, el programa óptimo de operaciones presenta un “makespan” de 183,33 h, muy por debajo de las 233,33 h mínimas que podrían alcanzarse al implementar el modelo de operaciones secuenciales (ver

Tabla VI.4). En suma, el horizonte de planeación puede acortarse más de dos días respecto de su longitud original, manteniendo los costos operativos en el mismo valor óptimo.

Por otra parte, debe destacarse que el número de corridas individuales se incrementa a 11, aunque los bloques incluidos en el conjunto K se limitan a 9. En problemas de escala real, al permitir la ejecución de impulsiones simultáneas, la cardinalidad del conjunto K y las dimensiones del modelo se reducen significativamente. Estas características se ponen de manifiesto en la Tabla VI.4. Sin embargo, el tiempo de CPU que insume la resolución se eleva de 51,7 seg. a 275,3 seg. Esto se debe principalmente a que se trata de un ejemplo pequeño. En el próximo caso, las ventajas computacionales del nuevo enfoque son aún más claras. Tal como se ha remarcado, los costos de bombeo y reprocesamiento de interfases son similares para ambas soluciones.

La Figura VI.10 describe las *fases de inyección* de combustibles que se producen en las diferentes tuberías que conforman la red al implementarse el programa de operaciones secuenciales. Una *fase de inyección* representa el intervalo de tiempo durante el cual un poliducto recibe material, ya sea a través de un nuevo lote proveniente de los tanques de almacenamiento de la estación de origen (indicados con un recuadro) o bien desde un poliducto adyacente en operaciones de transferencia directa (“tightlining”).

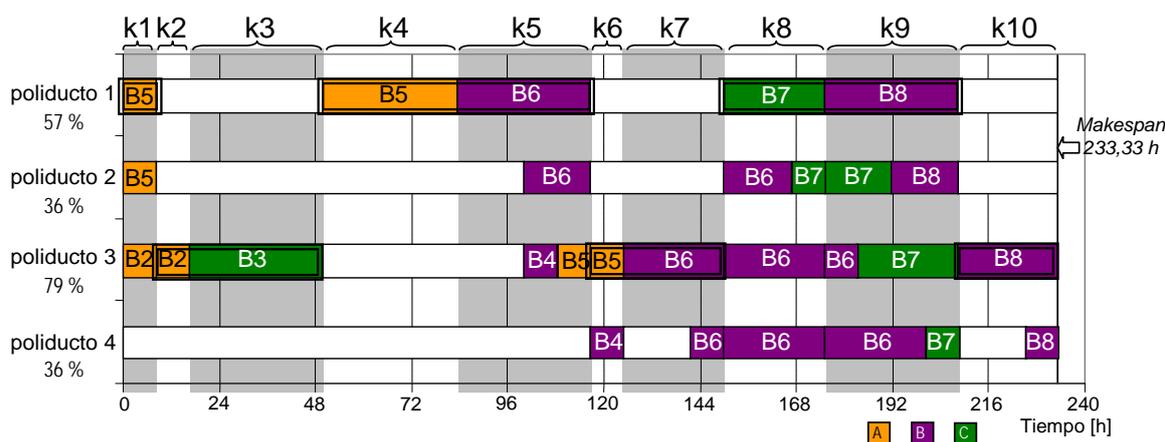


Figura VI.10. Fases de Inyección en el Programa de Operaciones Secuenciales para el Ejemplo VI.1

Al ejecutar la corrida $k1$, se presentan diversas fases de inyección. Un volumen adicional de combustible A se inyecta al lote $B5$ en el origen del poliducto # 1, una parte del mismo lote $B5$ se transfiere a la línea # 2,

mientras una fracción del “batch” *B2* avanza hacia la tubería # 3. Por ende, tres poliductos permanecen activos. Durante la instancia *k2*, la línea # 3 incorpora material proveniente de la terminal de ingreso *S2* dentro del lote *B2*. En este caso, la actividad del sistema de tuberías queda confinada exclusivamente al tramo # 3, pues una cantidad equivalente del propio lote *B2* se transfiere a tanques del destino *D2*, en el extremo opuesto del mismo conducto. El número de fases de inyección se incrementa en forma notoria en ejecuciones posteriores, como *k8*. Por medio de la corrida *k8* se inyecta el nuevo lote *B7* en la sección de ingreso al poliducto # 1. Al mismo tiempo, el lote *B6* avanza en su recorrido a través de los poliductos # 2, 3 y 4, y la sección más adelantada de *B7* logra finalmente ingresar a la tubería # 2. Por consiguiente, la actividad de bombeo se extiende a lo largo de todos los poliductos del sistema. Como puede observarse en el lado izquierdo de la misma Figura VI.10, el tramo más comprometido corresponde al poliducto # 3, aunque su nivel de utilización a lo largo del programa apenas alcanza el 79%.

Por su parte, la Figura VI.11 muestra las operaciones de ingreso a cada poliducto al implementarse el programa de inyecciones simultáneas. Queda claro que la actividad de las diferentes tuberías que conforman la red se ha incrementado en forma notoria, y la capacidad de transporte del sistema se utiliza mucho mejor. En particular, la actividad del tramo # 3 alcanza el 100%, constituyéndose en el recurso “cuello de botella” de la red.

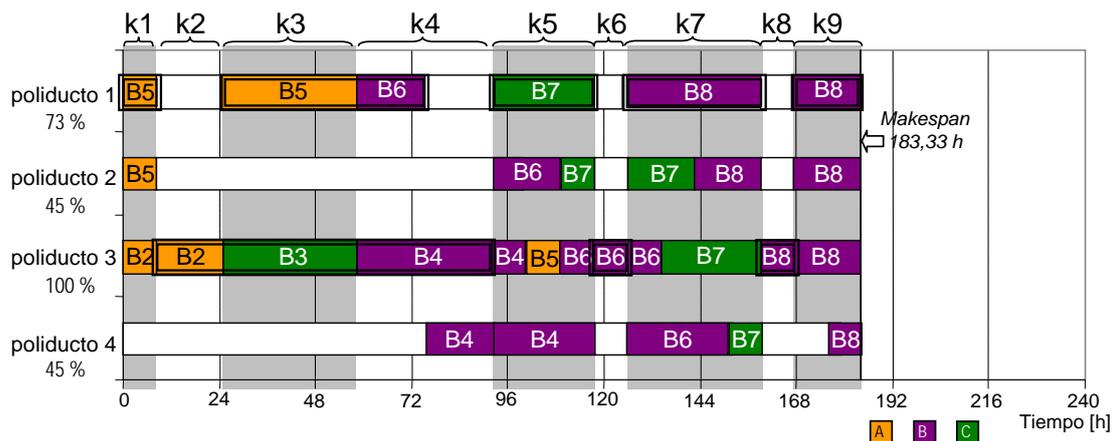


Figura VI.11. Fases de Inyección en el Programa de Corridas Simultáneas para el Ejemplo VI.1

Las fases de inyección correspondientes a las dos primeras ejecuciones prácticamente coinciden con las del modelo secuencial. No obstante, habiendo

posicionado los lotes en la ubicación correcta, aparecen grandes diferencias entre ambos programas al ejecutar el bloque de inyecciones k_3 . En esta ocasión, una parte adicional del lote B_5 ingresa al poliducto # 1, al tiempo que el nuevo lote B_3 se inyecta en la línea # 3. El flujo de material se concentra exclusivamente en las tuberías # 1 y 3, y no en poliductos adyacentes, ya que las operaciones de descarga se producen en los destinos D_1 y D_2 , ubicados en el extremo posterior de cada tramo. Durante los bloques k_5 , k_7 y k_9 , todo el sistema de transporte se mantiene activo. Cada una de estas ejecuciones se asocia a una única inyección de combustible en el origen del poliducto # 1.

VI.5.2 Ejemplo VI.2: Red de Poliductos Argentinos

Como corolario del presente trabajo, se buscará resolver un caso de estudio de dimensiones reales, que involucra una parte importante de la red de poliductos con los que cuenta la Argentina. En particular, se abordará el programa de distribución de múltiples combustibles a través de tres tuberías unidireccionales interconectadas, operadas en la actualidad por la empresa Repsol YPF (ver Figura VI.12).*

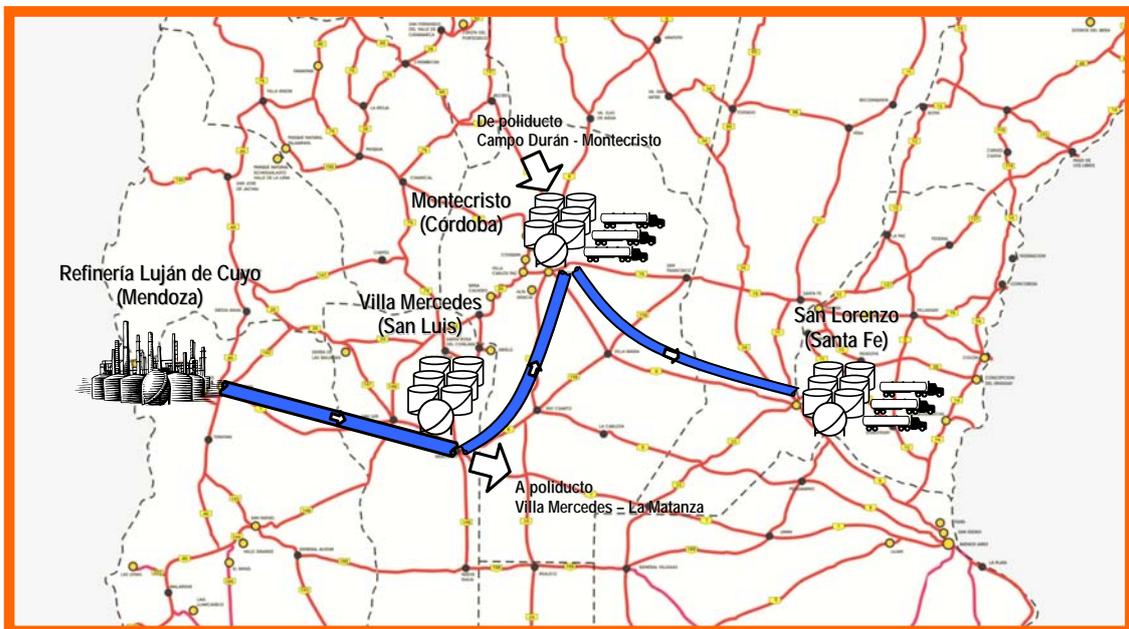


Figura VI.12. Red de Poliductos Argentinos del Ejemplo VI.2

* Los datos relacionados al problema constituyen información aproximada, obtenida principalmente de los registros de la Secretaría de Energía de la Nación.

Configuración Física de la Red e Instalaciones Disponibles

El primer tramo de tubería, con un diámetro de 14" y 338 km de longitud aproximada, une la refinería de Luján de Cuyo, en la provincia de Mendoza (nodo *N1*) con la terminal de tanques de Villa Mercedes, San Luis (nodo *N2*). La unidad de refino de Luján de Cuyo (Repsol YPF) constituye la segunda en importancia del país. El depósito de origen, donde se almacenan los productos generados por esta destilería, conforma la cabecera o primer nodo de ingreso de combustibles a la red. Por su parte, la terminal de Villa Mercedes representa un punto estratégico para la recepción y el re-bombeo de material. El objetivo principal de esta estación intermedia es alimentar a otro poliducto lateral extenso, que llega hasta la terminal de tanques de La Matanza, en la provincia de Buenos Aires. Allí se concentra gran parte de la demanda nacional, aunque los combustibles provenientes de Luján de Cuyo cubren tan sólo una fracción de sus requerimientos. El resto se aprovisiona directamente desde la destilería de La Plata (Bs. As.), la de mayor capacidad de refino del país. A pesar de que la operación detallada de este poliducto lateral no forma parte del presente análisis, el programa de transporte deberá atender las necesidades de la terminal de Villa Mercedes para evitar su desabastecimiento a lo largo del horizonte.

El segundo poliducto de la red, con 12" de diámetro y 320 km de extensión, comunica la terminal de Villa Mercedes con la granja de tanques de Montecristo, en la provincia de Córdoba (nodo *N3*). Este centro logístico, operado por Repsol YPF, es otro de los puntos clave en la cadena de suministro de combustibles del país. No sólo recibe material proveniente de la refinería de Luján de Cuyo, sino que allí también confluye una parte importante de la producción de la destilería de Campo Durán (Salta) a cargo de la empresa Refinor. El transporte principal de estos combustibles se realiza por medio de un poliducto lateral operado por Refinor, aunque su funcionamiento excede el alcance de este ejemplo. No obstante, el flujo de combustibles que se descarga en el centro de operaciones *N3* desde el ramal Campo Durán – Montecristo forma parte de la información relevante a tener en cuenta en la resolución del caso.

El tercer y último tramo de tubería posee un diámetro de 12" y 380 km de longitud, y su objetivo es abastecer a la terminal de recepción ubicada en la localidad de San Lorenzo, provincia de Santa Fe (nodo *N4*) a partir del envío de combustibles impulsados desde Montecristo (*N3*). Es importante notar que el

nodo $N3$ constituye una terminal de tanques con propósito dual: (i) recepción y distribución de combustibles hacia el mercado, y (ii) inyección de envíos hacia la terminal de San Lorenzo. En la región de influencia de los nodos $N3$ y $N4$ se concentra otra parte importante de la demanda nacional de productos refinados, abasteciendo las dos localidades más pobladas del interior del país: Córdoba y Rosario. En síntesis, el plan de bombeo involucra la operación de tres poliductos unidireccionales en serie, cuyo contenido se estima en 33600 m³, 23300 m³ y 27700 m³, uniendo las terminales de Luján de Cuyo ($N1$), Villa Mercedes ($N2$), Montecristo ($N3$) y San Lorenzo ($N4$), respectivamente.

Conjunto de Productos Transportados

Si bien estas líneas suelen transportar más de una decena de especies, casi el 90% del flujo se concentra en sólo cinco productos, según registros de la Secretaría de Energía de la Nación. El plan de operaciones del Ejemplo VI.2 se enfocará en la impulsión y distribución coordinada de cinco combustibles: Nafta "C" ($P1$), Gasoil ($P2$), Gases Licuados de Petróleo ($P3$), Jet-fuel ($P4$) y Nafta "V" ($P5$). Tal como se visualiza en el esquema de la Figura VI.13, no todos los combustibles se requieren en todos los centros de recepción.

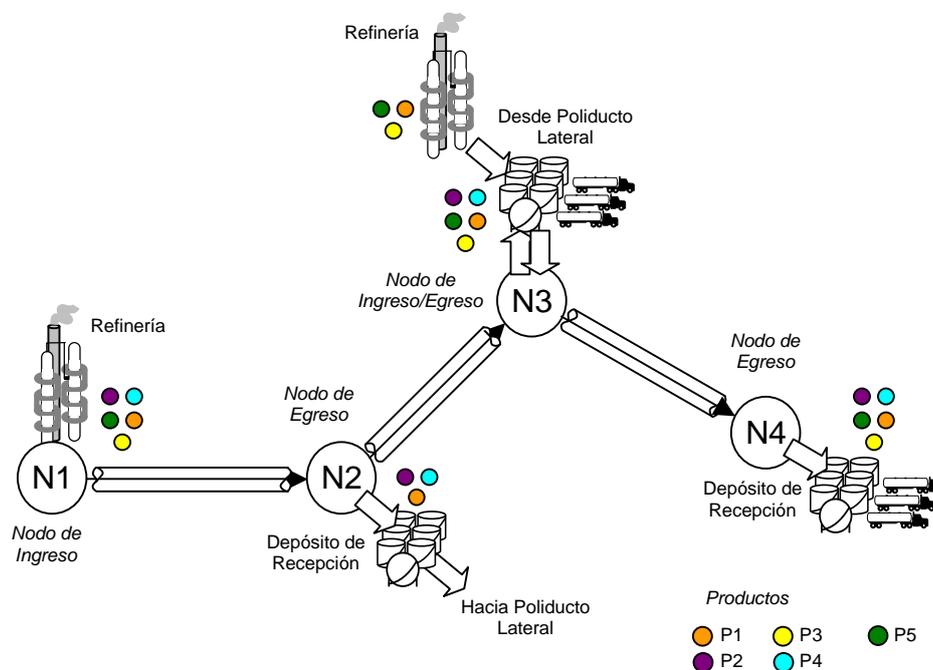


Figura VI.13. Esquema de la Red de Poliductos del Ejemplo VI.2

En efecto, la terminal de tanques de Villa Mercedes extrae de la línea sólo tres productos (*P1*, *P2* y *P4*) para redespacharlos a través del poliducto lateral que abastece a la provincia de Buenos Aires. El centro de cargas de San Lorenzo demanda todas las especies, en tanto que la estación de Montecristo presenta un comportamiento particular. Pese a que posee tanques para la recepción y el almacenamiento de todos los productos, aquellos provenientes del norte del país (*P1*, *P3* y *P5*) se distribuyen directamente en la región aledaña al depósito, mientras un volumen adicional se reinyecta en el poliducto que abastece a la terminal *N4*. Por consiguiente, de los combustibles procesados en Luján de Cuyo, Montecristo sólo demanda *P2* y *P4*. La Tabla VI.5 describe los volúmenes requeridos por las terminales de carga para atender a los mercados de cada región geográfica, considerando un horizonte de planeación típico de 10 días de duración (240 h).

Tabla VI.5. Demandas de Combustibles en los Centros de Recepción (en m³)

	N2	N3	N4	Total
P1	5110	-	12180	17290
P2	41340	39210	27700	108250
P3	-	-	17820	17820
P4	3090	2120	1100	6310
P5	-	-	37170	37170

En cuanto al aprovisionamiento de los combustibles, la refinería de Luján de Cuyo dispone de un volumen importante de todas las especies. Sin embargo, desde Campo Durán, donde se procesan crudos más livianos, es fundamental el aporte de productos refinados, especialmente *P3* y *P5*, que se hacen llegar hasta la terminal intermedia *N3* a través del poliducto lateral de Refinor. La Tabla VI.6 resume los stocks de productos con los que se cuenta en los nodos *N1* y *N3* para nuevos envíos en el transcurso de los próximos 10 días. Como puede notarse, la disponibilidad total excede los requerimientos de los destinos, aunque debe tenerse en cuenta que parte de este material se deberá utilizar en las últimas ejecuciones del programa para “barrer” lotes previamente inyectados.

Tabla VI.6. Disponibilidad de Combustibles por Nodo (en m³)

	N1	N3	Total
P1	25884	4548	30432
P2	167772	-	167772
P3	5316	21384	26700
P4	9468	-	9468
P5	20532	30876	51408

Por simplicidad, el caudal de transporte en todos los poliductos de la red se ajusta a un mismo rango de valores admisibles que va desde 310 a 580 m³/h, independientemente del combustible impulsado. Los costos unitarios de bombeo, según el producto y la fuente de ingreso, así como las pérdidas vinculadas al reprocesamiento del material de interfase se muestran en las Tablas VI.7 y VI.8, respectivamente. Estos valores fueron adoptados tomando como referencia otros casos de estudio presentados en la literatura del área. Los costos de transición se suponen invariables con el caudal de transporte, las detenciones parciales de la línea y la distancia recorrida por los lotes. Más aún, ciertas interfases, indicadas con una “X” en la Tabla VI.8, directamente se prohíben por incompatibilidad entre las especies. En particular, el combustible *P3* no puede transportarse inmediatamente antes o después de las especies *P2* o *P4*.

Tabla VI.7. Costos Unitarios de Bombeo por Producto y Nodo de Ingreso (en US\$/m³)

	N1	N3
P1	8,136	3,042
P2	9,492	-
P3	10,170	4,056
P4	8,814	-
P5	8,814	3,380

Tabla VI.8. Costos Totales de Reproceso de Interfases (en US\$)

	Sucesores				
	P1	P2	P3	P4	P5
P1	0	3600	3600	4500	2700
P2	3600	0	X	2700	5000
P3	3600	X	0	X	3500
P4	4500	2100	X	0	4500
P5	2400	5100	3000	5400	0

Por otra parte, para evitar impulsiones demasiado extensas, que puedan provocar el desabastecimiento transitorio de las terminales de ingreso, se ha impuesto una cota máxima al tamaño de las inyecciones igual a 30000 m³. Asimismo, cualquier transferencia de material desde un lote en tránsito hacia un centro de recepción en el transcurso de una corrida de bombeo no debe ser inferior a 1000 m³. El objetivo es impedir un elevado número de operaciones de arranque y detención de las estaciones impulsoras, que deriven en programas demasiado costosos.

La disposición inicial de envíos dentro de la red se ilustra en la Figura VI.14. Se trata de una total de cinco lotes que se distribuyen como sigue: (i) el poliducto *N1-N2* contiene a los “batches” *B6* (con producto *P4*), *B5* (con producto *P2*) y la sección más retrasada del lote *B4*, que transporta combustible *P1*; (ii) a través del segundo tramo (*N2-N3*) fluye el segmento más adelantado de *B4*, junto con el “batch” *B2*, que contiene producto *P5*; y (iii) el interior del poliducto *N3-N4* permanece completamente lleno de combustible *P2*, en el “batch” identificado como *B1*. Además, se supone la existencia de un lote vacío (*B3*), para contemplar la posibilidad de inyectar un nuevo lote en la interfase de los envíos *B4* y *B2*. El intervalo de inyección y el volumen de producto asociado al “batch” *B3* son decisiones del propio modelo.

El objetivo del problema es obtener el programa de operaciones de la red de poliductos para los próximos 10 días (240 h) procurando satisfacer las necesidades de combustible en todas las terminales de recepción, a mínimo costo total (bombeo, interfases e incumplimientos en la demanda). Los denominados costos de “backorder” pueden presentarse cuando una parte de las solicitudes queden insatisfechas al culminar el período de planeación, y

como tales deben penalizarse con cierta firmeza. Se adopta un costo de 100 (US\$/m³) por unidad de producto de cualquier tipo que no pueda atenderse a término en los destinos del sistema.

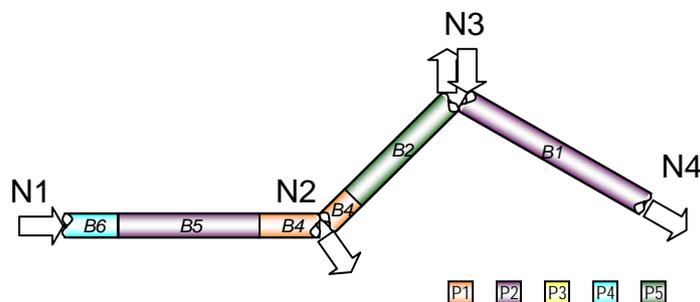


Figura VI.14. Disposición Inicial de Envíos en los Poliductos del Ejemplo VI.2

Programa de Inyecciones Simultáneas

El programa de transporte óptimo para el Ejemplo VI.2, que admite operaciones simultáneas de bombeo en más de un nodo de ingreso, se representa en la Figura VI.15. El mismo incluye un total de 12 inyecciones de combustible (6 desde la refinería de Luján de Cuyo y 6 desde la terminal de Montecristo) que se agrupan en 8 bloques de ejecuciones. Como ciertas corridas de impulsión sólo incorporan combustibles dentro de “batches” en tránsito, el número de lotes transportados a través de la red durante el horizonte temporal se limita a 10. En la parte superior de la Figura VI.15 se muestra el sistema de tuberías mediante una representación simplificada, que dispone los poliductos en línea. Una de las principales ventajas de las formulaciones continuas respecto de los modelos discretos es el fácil manejo de las rutas de transporte, con dos o más tuberías entre los nodos de ingreso y recepción de combustibles. En tales circunstancias, los envíos fluyen de un poliducto a otro a través de lo que se denominan operaciones de “tightlining” o transferencia directa. Los modelos continuos reducen las transferencias directas a simples avances de los lotes a lo largo de su recorrido. La segunda fila del diagrama resume el estado inicial de envíos dentro de la red de poliductos, mientras las restantes líneas muestran el seguimiento de los lotes a lo largo del trayecto. También se incluyen las transferencias de material hacia los nodos de recepción a medida que se ejecutan nuevos bloques de corridas de bombeo en los nodos de ingreso N1 y N3.

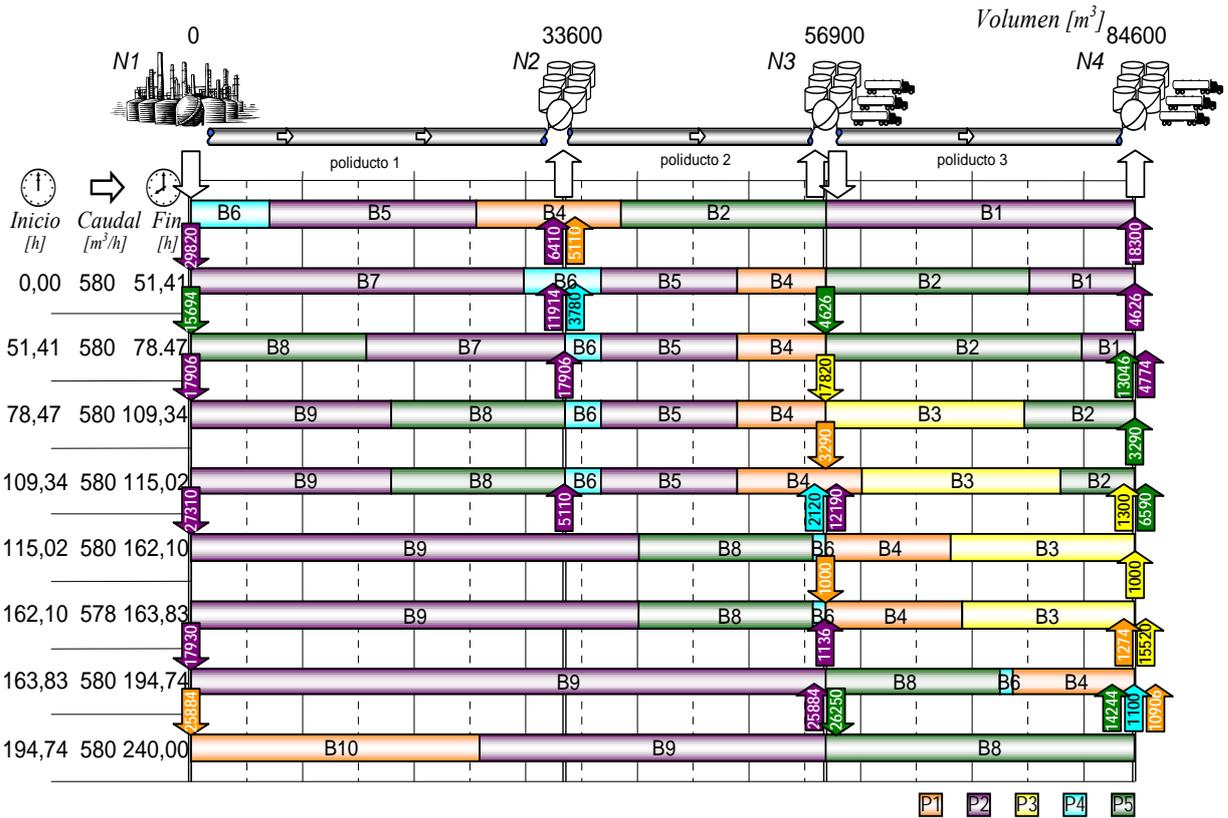


Figura VI.15. Programa Óptimo de Inyecciones Simultáneas para el Ejemplo VI.2

El primer bloque de operaciones (k_1) se desarrolla desde el instante $t = 0,00$ h hasta $t = 51,41$ h, e involucra la inyección del nuevo “batch” B_7 con 29820 m³ de combustible P_2 en la terminal N_1 . Durante esta corrida de bombeo, la interfase B_2 - B_4 avanza en su recorrido hasta alcanzar la coordenada precisa del nodo intermedio N_3 . Se producen además tres descargas de material: dos partidas de 5110 m³ y 6410 m³ de productos P_1 y P_2 se transfieren desde los lotes B_4 y B_5 hacia la terminal N_2 , mientras la derivación de 18300 m³ de combustible P_2 desde el “batch” B_1 al destino N_4 facilita el movimiento de la interfase B_4 - B_2 hacia la posición antes descrita.

Los siguientes bloques k_2 y k_3 comprenden la ejecución de inyecciones paralelas en dos terminales de ingreso. En el transcurso del bloque k_2 , desde la hora 51,41 h hasta la hora 78,47 h, se inyecta producto P_5 en ambos nodos N_1 y N_3 . Un nuevo lote B_8 con 15694 m³ de P_5 se introduce en la refinería de Luján de Cuyo, al tiempo que un volumen de 4626 m³ de la misma especie se incorpora al lote B_2 en la terminal de Montecristo. La inyección de combustible en el nodo N_1 tiene lugar al caudal máximo de 580 m³/h, mientras que la incorporación de P_5 desde N_3 se produce a un ritmo

significativamente menor. El flujo de material en la red queda confinado exclusivamente a los poliductos # 1 y 3, esto es Luján de Cuyo – Villa Mercedes, y Montecristo – San Lorenzo. Por su parte, el bloque de ejecuciones k_3 involucra un segundo par de corridas simultáneas de impulsión desde los nodos N_1 y N_3 . Un nuevo “batch” B_9 transportando 17906 m³ de producto P_2 es provisto desde el origen N_1 , mientras que el lote B_3 , previamente vacío, es ahora inyectado desde los tanques de la terminal N_3 con un volumen de 17820 m³ de producto P_3 . Ambas operaciones se desarrollan con caudales de inyección elevados (580 y 577,21 m³/h, respectivamente).

En síntesis, la coordinación precisa entre las actividades de impulsión y despacho de combustibles en la red de poliductos, obtenida por resolución del nuevo modelo propuesto, permite atender las necesidades de todos los centros de recepción en el transcurso de los 10 días que componen el horizonte. Más aún, como la cantidad de producto P_4 contenida en el “batch” inicial B_6 excede en 690 unidades la demanda total de P_4 en los destinos N_2 - N_3 - N_4 , el volumen sobrante se retira rápidamente del sistema en la terminal más próxima, es decir N_2 . En efecto, el destino N_2 recibe 3780 m³ de P_4 desde el lote B_6 , a pesar de haber solicitado sólo 3090 m³. En todos los demás casos, las entregas de combustibles desde la red satisfacen con exactitud las demandas planteadas. Como era de esperar, el stock de los productos P_1 , P_3 y P_5 en la estación intermedia N_3 prácticamente se agota, buscando acortar el recorrido de los lotes hacia el destino final N_4 . La disponibilidad de estos productos se consume en un 94,33%, 83,33% y 100%, respectivamente, al finalizar las operaciones. De este modo, se logra una reducción importante en los costos de bombeo que resultan del plan. La Tabla VI.9 reporta la utilización porcentual de los volúmenes de productos ofrecidos por los centros N_1 y N_3 .

Tabla VI.9. Consumo de Combustibles por Terminal de Ingreso, Según el Programa de Inyecciones Simultáneas del Ejemplo VI.2

	N1	N3
P1	100,00%	94,33%
P2	55,41%	-
P3	0,00%	83,33%
P4	0,00%	-
P5	76,44%	100,00%

Programa de Inyecciones Secuenciales

A los efectos de comparar el desempeño computacional y los resultados operativos de la nueva formulación respecto del enfoque de corridas simples descrito en el Capítulo V, se ha resuelto el mismo Ejemplo VI.2 a partir del modelo secuencial. Para realizar una comparación equitativa, se adoptaron inicialmente conjuntos de inyecciones y “batches” de dimensiones equivalentes, esto es: $|K| = 8$, e $|I| = 10$. El programa de inyecciones secuenciales que surge de la resolución de este modelo se describe en la Figura VI.16. El mismo incluye un total de 8 corridas de bombeo, en lugar de las 12 que se obtienen en el plan de ejecuciones simultáneas.

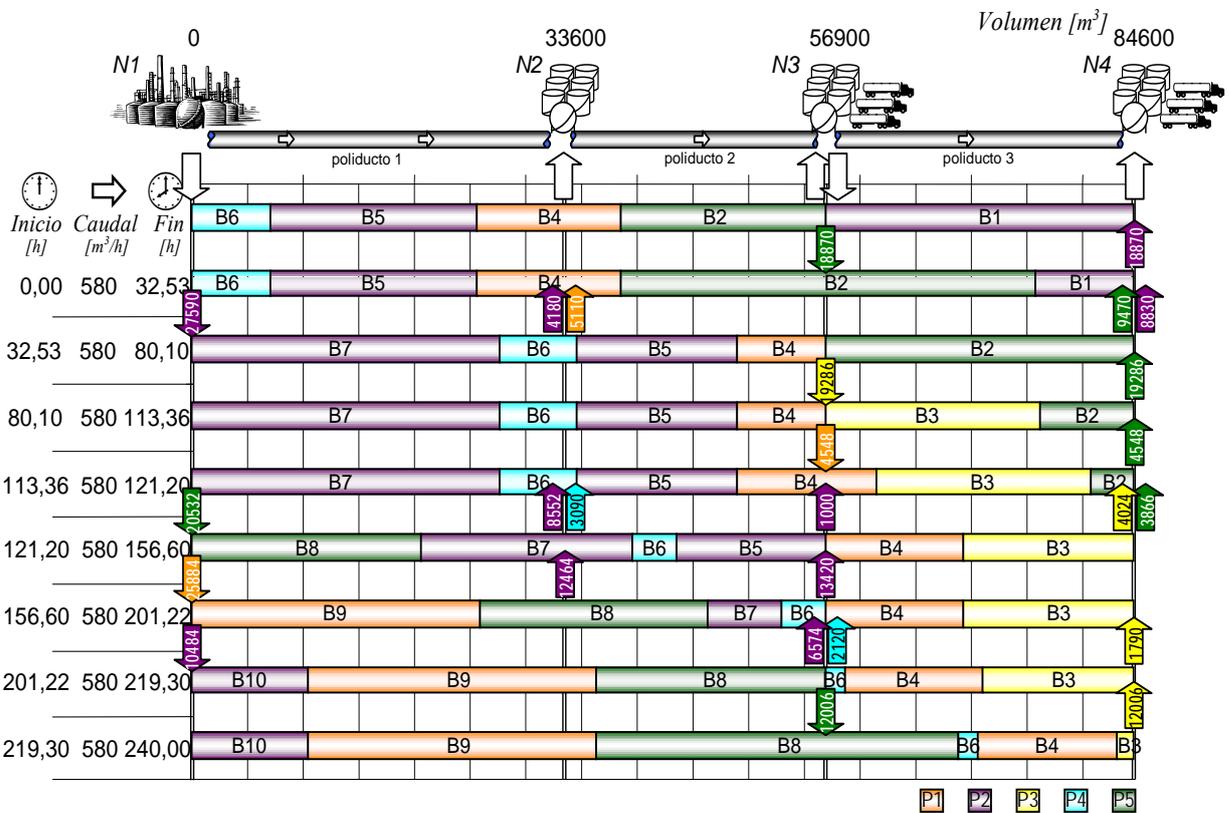


Figura VI.16. Programa Secuencial Obtenido para el Ejemplo VI.2, con 8 Corridas de Bombeo Individuales

Si bien las dimensiones de ambos modelos son prácticamente idénticas, el tiempo de CPU requerido para la resolución se incrementa 5 veces respecto del enfoque coordinado, esto es, de 865,8 seg. a 4330,5 seg. de CPU (ver Tabla VI.10). El costo computacional crece abruptamente, aún cuando el número de operaciones individuales se reduce en forma significativa. Como resultado, se

observa una limitación importante en el nivel de utilización de la línea, que imposibilita el cumplimiento del 25,5% de las demandas pactadas para los próximos 10 días. Esta reducción de la actividad del sistema de transporte, especialmente marcada en las inyecciones del nodo de ingreso *N1*, explica la disminución en los costos de bombeo que resultan del programa secuencial (ver Tabla VI.10).

Tabla VI.10. Dimensiones del Modelo y Resultados Computacionales para el Ejemplo VI.2

	Bloq. K	Lotes I	Ecs.	Var. Cont.	Var. Bin.	Tiempo CPU [s]	Iter. [10 ⁶]	Tol. Opt. [%]	Costos Bombeo [10 ³ US\$]	Costos Interf. [10 ³ US\$]	Back orders [%]
SIN ₈	8	10	4605	2504	450	865,8	17,6	0.0	1421,0	33,7	0,0
NSI ₈	8	10	4461	2504	450	4330,5	88,4	<0,1	949,4	31,0	25,5
NSI ₉	9	10	4977	2808	500	20000	361,5	0,2	946,8	32,6	25,5

SIN₈ : Inyecciones Simultáneas (8 bloques)

NSI₈ : Inyecciones Secuenciales (8 corridas)

NSI₉ : Inyecciones Secuenciales (9 corridas)

Analizando las características de ambos enfoques, podría argumentarse que la incapacidad del modelo secuencial para alcanzar mejores resultados deviene del limitado número de ejecuciones propuestas. Sin embargo, al incrementar la cardinalidad del conjunto *K* de 8 a 9, no se alcanzan mejoras notorias en el plan de bombeo. De hecho, los “backorders” se mantienen en el 25,5% del volumen original de demanda, y la optimalidad del problema no se puede garantizar, aún después de 20000 segundos de CPU (ver Tabla VI.10). El programa de transporte ampliado a 9 inyecciones secuenciales se ilustra en la Figura VI.17. Como se desprende del diagrama, la leve mejoría de este último plan resulta de maximizar la utilización de los volúmenes de productos disponibles en el nodo *N3*, que logran inyectarse en su totalidad. Sin embargo, la secuencia de combustibles impulsados resulta menos conveniente, con interfases todavía más costosas.

En suma, el nuevo enfoque de inyecciones simultáneas presenta enormes ventajas respecto de los modelos de operación secuencial. Entre ellas, pueden destacarse las siguientes: (1) el mantenimiento de un enfoque continuo, tanto en la escala de tiempo como de volumen; (2) a igualdad de tamaño de los modelos, el número de operaciones de ingreso y transferencia de combustibles muestra un incremento del 50% usando la nueva formulación matemática; (3) el costo computacional del método de solución se acorta

notablemente, y pueden encontrarse más y mejores soluciones factibles en mucho menos tiempo; y (4) la utilización de la red de transporte aumenta en forma significativa. Estos logros se obtienen a partir de una coordinación efectiva entre las corridas de inyección que se ejecutan en las diferentes fuentes de suministro de una red de poliductos principales interconectados entre sí. En la actualidad se está avanzando en el desarrollo de un nuevo modelo de planeación de redes de poliductos de tipo continuo, que permita extender el concepto a horizontes más amplios, abordando sistemas de transporte con tuberías de flujo bidireccional y estructuras ramificadas.

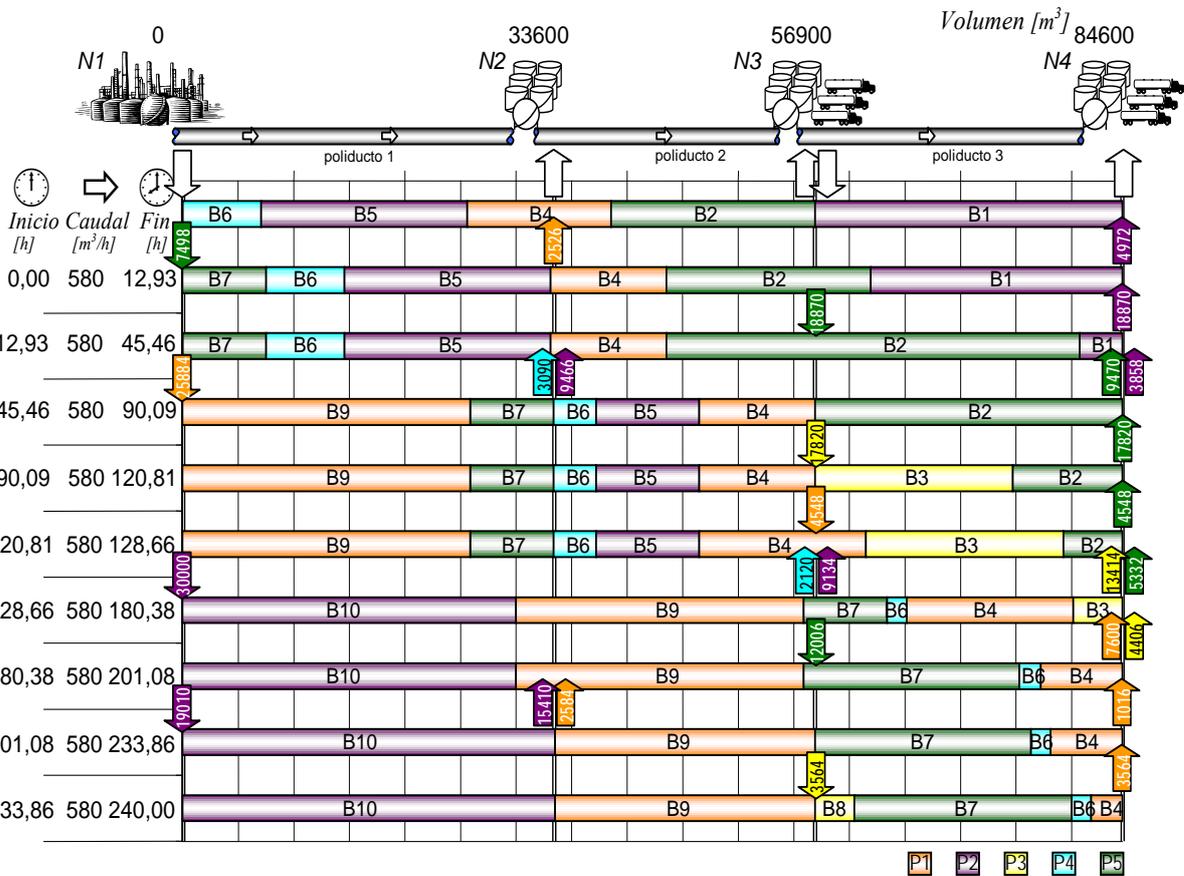


Figura VI.17. Programa Secuencial Obtenido para el Ejemplo VI.2, con 9 Corridas de Bombeo Individuales

VI.6 Consideraciones Finales

En el desarrollo de este capítulo, se ha presentado una formulación MILP altamente eficiente en términos computacionales para la programación operativa de redes de poliductos, que permitan la inyección simultánea de combustibles en múltiples nodos de suministro. El modelo matemático

propuesto está restringido a la planeación de sistemas de transporte con flujo unidireccional, y una única tubería vinculando cada par de nodos adyacentes. Aun así, se ha logrado replicar con éxito el funcionamiento de terminales de carga complejas, con propósito dual, que realizan operaciones coordinadas de inyección y/o recepción de lotes para su distribución local.

El enfoque de nivel único expuesto en este capítulo del trabajo facilita la configuración de secuencias óptimas de combustibles en cada terminal de ingreso, determinando además la dimensión más conveniente para los lotes, el caudal de transporte, los tiempos de inicio y finalización de las ejecuciones, y la asignación de los envíos a las diferentes terminales de recepción, todo en un solo paso. Del mismo modo, el modelo es capaz de realizar el seguimiento de la posición y el tamaño de los lotes en los diferentes poliductos a través del tiempo, manteniendo los niveles de stock en tanques de las refinerías y depósitos dentro del rango de valores admisibles. Las variaciones en el caudal de transporte a causa de las modificaciones en el diámetro de las tuberías pueden manejarse con relativa facilidad. La formulación incluye restricciones matemáticas simples para la gestión de inyecciones simultáneas, evitando que las mismas interfieran entre sí. Esas ecuaciones especifican que todo poliducto puede recibir material desde una única fuente, sea ésta la descarga de una tubería adyacente (aguas arriba del sistema), o la granja de tanques que alimenta la sección de ingreso a la línea.

Una de las mayores ventajas de la ejecución de corridas paralelas es el mejoramiento en el nivel de utilización de la capacidad instalada, y la consecuente reducción en el tiempo requerido para completar todas las operaciones (“makespan”). De este modo, es más probable satisfacer los requerimientos de los destinos en tiempo y forma, a través de la ejecución de un número mayor de impulsiones en el transcurso del horizonte abordado. Por tal razón, se ha seleccionado como criterio primario para la evaluación de soluciones el mínimo costo total, con un término que penaliza fuertemente el retraso en las entregas.

Asimismo, se observa que el nuevo enfoque permite descubrir buenos programas factibles de impulsión en mucho menos tiempo. En particular, se han logrado resolver exitosamente dos ejemplos concretos. Buscando ilustrar los beneficios que se obtienen al evolucionar del concepto de operación secuencial al de inyecciones simultáneas, se compararon las mejores soluciones alcanzadas con uno y otro modelo. El análisis de los resultados

permitió extraer conclusiones contundentes. Al admitir bloques de corridas paralelas en problemas de gran escala, la cardinalidad del conjunto K , las dimensiones del modelo, y en especial el tiempo de resolución se reducen en forma notoria. Para un caso de estudio real de la industria petrolera, el costo computacional disminuye por un factor de 5, a pesar de que el número de operaciones de impulsión se incrementa en un 50%. Además, los costos atribuibles al incumplimiento de la demanda pueden directamente eliminarse cuando se admite el desarrollo de ejecuciones simultáneas. Tales beneficios se desprenden de un nuevo concepto operativo, que logra la coordinación integrada de los flujos de ingreso y egreso de material en cada uno de los poliductos que componen la red de abastecimiento.

Finalmente, es importante destacar el hecho de haber podido resolver, por primera vez y en forma rigurosa, la programación de operaciones de transporte a través de poliductos múltiples, en la cadena de suministro de combustibles de Argentina. Este desarrollo abre las puertas hacia un manejo mucho más eficiente de estos recursos estratégicos clave, que en nuestro país aún no han recibido mayor atención.

Capítulo VII

Conclusiones Finales y Trabajos Futuros

VII.1 Conclusiones Generales

El análisis de los resultados alcanzados en el desarrollo de esta tesis nos permite extraer las siguientes conclusiones respecto de la programación operativa del transporte de combustibles a través de poliductos:

- (1) Se trata de un problema logístico ciertamente complejo, con un gran número de variables y restricciones a tener en cuenta. El movimiento secuencial de productos disímiles dentro de una misma tubería marca una diferencia fundamental respecto de la operación de cualquier otro modo de transporte.
- (2) La complejidad inherente al problema de operación de poliductos exige adoptar herramientas específicas de soporte a la toma de decisiones que permitan optimizar su manejo y reducir los costos involucrados.
- (3) Las técnicas de resolución propuestas en la literatura han sido escasas. En general, presentan resultados ineficientes, y su estructura es de naturaleza heurística o discreta.
- (4) A partir de esta tesis se logró por primera vez representar el problema sobre dominios continuos de tiempo y volumen.
- (5) Se desarrolló el primer enfoque exacto para el seguimiento de los lotes dentro de las tuberías en el tiempo, lo que constituye un aporte importante para el tratamiento realista del problema.
- (6) Los modelos propuestos en esta tesis son rigurosos y eficientes. Se reduce sensiblemente el número de variables y restricciones de la formulación, obteniendo modelos mucho más compactos y ajustados al funcionamiento real.
- (7) En problemas de gran escala, las representaciones discretas insumen tiempos inadmisibles para la práctica. En cambio, los modelos desarrollados permiten encontrar programas de operación más económicos, en tiempos computacionales acordes a la realidad.
- (8) El enfoque es lo suficientemente robusto como para ser extendido a horizontes más largos, y aplicado a configuraciones logísticas más complejas.

Los modelos de representación que se describen en este trabajo no sólo han logrado introducir un cambio conceptual en la programación de sistemas

de transporte por poliductos, sino que también han facilitado la resolución de problemas de la industria petrolera moderna, que no encontraban en las técnicas previas la herramienta de soporte apropiada.

VII.2 Alcances de los Modelos Propuestos

VII.2.1 Operación de Poliductos con Origen y Destino Únicos

El primer paso en la resolución del programa de transporte a través de poliductos es el estudio de la configuración más simple, en la cual una tubería conecta una fuente de refino de combustibles con un centro de distribución importante (ver Figura VII.1). La representación continua del movimiento de material dentro de la línea ha derivado en el desarrollo de una herramienta de máxima eficiencia para la programación de operaciones en poliductos unidireccionales con origen y destino únicos (ver Anexo I). Los logros más destacados se resumen a continuación:

- (a1) El modelo determina en un solo paso la secuencia óptima de inyección de productos y el programa de ingreso y descarga de lotes desde la línea.
- (a2) Puede adoptarse un caudal de bombeo distinto según el tipo de combustible impulsado desde la refinería.
- (a3) La simplicidad del modelo facilita su aplicación a horizontes de planeación extendidos a un mes.
- (a4) Se optimizan decisiones críticas para la gestión de operaciones de recepción, almacenamiento y descarga de productos en la terminal de destino.
- (a5) Se selecciona el tamaño más conveniente para los envíos, a partir de un conjunto limitado de alternativas. El volumen de los lotes transportados coincide exactamente con la capacidad de los tanques asignados.
- (a6) La nueva herramienta permite planificar ajustadamente las operaciones de retención y asentamiento de productos (“settling”) y los procedimientos de control y aprobación de lotes en el depósito, antes de despacharse al mercado. La duración del período de control puede variar de un producto a otro, según lo especifica el propio operador de la línea.

- (a7) Es posible identificar el momento exacto en que se libera cada lote, realizando un seguimiento preciso del stock y el despacho de combustibles, día por día.
- (a8) Al acotar el número de restricciones y variables involucradas, el costo computacional del procedimiento de búsqueda de soluciones es mucho menor. Los tiempos de resolución se reducen hasta dos órdenes de magnitud respecto de otros enfoques.



Figura VII.1. Poliducto Simple con Origen y Destino Únicos

Para validar la propuesta, se ha logrado resolver exitosamente un caso de estudio real de la compañía logística CLC (Portugal) programando las operaciones de una tubería simple que abastece de productos al principal centro de distribución del país, desde una refinería distante. Al evaluar escenarios distintos, con secuencias de combustibles preestablecidas, semi-definidas o abiertas, el desempeño del modelo es muy superior frente a otras representaciones. Las variables binarias utilizadas decrecen en un orden de magnitud, y el tiempo de CPU se reduce sensiblemente. Asimismo, el porcentaje de utilización del poliducto se eleva al 99,9%, y los niveles de inventario proyectados se ajustan con precisión al perfil de demanda, minimizando la posibilidad de retrasos o “backorders” en horizontes futuros.

VII.2.2 Operación de Poliductos con Origen Único y Múltiples Destinos

La proyección del modelo continuo propuesto para tuberías simples ha permitido resolver el programa de transporte de combustibles en poliductos más complejos, con múltiples terminales de recepción a lo largo del recorrido (ver Figura VII.2). Estudiando el comportamiento particular de los modelos de planeación de poliductos en horizontes más amplios, se ha logrado diseñar una estructura MILP eficiente, articulada sobre un horizonte rodante multi-período. El enfoque facilita la revisión periódica del programa de operaciones asignando múltiples fechas de entrega o “due-dates” a la atención de las demandas, usualmente fijadas al final de cada período (ver Anexo II).

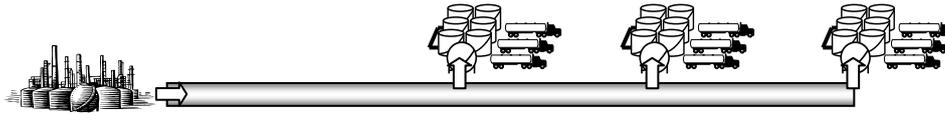


Figura VII.2. Poliducto Simple con Origen Único y Múltiples Destinos

Entre los resultados más importantes de la formulación propuesta se destacan los siguientes:

- (b1) Permite establecer y reajustar periódicamente el programa de bombeo teniendo en cuenta: (i) las variaciones en el perfil de requerimientos de las terminales, (ii) el plan de producción de la refinería, según las calidades de crudos disponibles para su procesamiento, y (iii) la posibilidad de reasignaciones parciales de los “batches” en tránsito a otros destinos.
- (b2) Al considerar el ambiente dinámico en que debe desarrollar su actividad el programador del poliducto, la secuencia de inyecciones propuestas a lo largo del horizonte es muy distinta al programa de bombeo que se obtiene con las técnicas convencionales sobre horizontes estáticos. Las mayores diferencias se manifiestan en aquellas operaciones programadas para el final del horizonte.
- (b3) A medida que el horizonte rueda, las inyecciones planeadas de combustibles se van ajustando cada vez más a los volúmenes exactos que demandan los destinos, y el número de operaciones de impulsión y descarga se incrementa período a período.
- (b4) Se tiende a la sustitución progresiva de grandes lotes de “relleno” o de “barrido” por envíos más pequeños, que se entregan a las terminales en períodos futuros.
- (b5) Las corridas finales están siempre orientadas al cumplimiento de órdenes futuras, anticipando la inserción de productos en la línea para alcanzar los destinos donde se los requiere, en el momento especificado.
- (b6) El tiempo ocioso del sistema puede reducirse a la mínima expresión, incrementando el nivel de aprovechamiento del recurso en más de un 21%.

- (b7) El costo computacional del procedimiento resolutivo para horizontes de cuatro semanas se mantiene en valores razonables, que en ningún caso superan los 330 seg. de CPU.
- (b8) La metodología desarrollada es un aporte valioso a la resolución de casos de estudio de magnitud real. Las propuestas anteriores no lograron extender el horizonte del plan a más de 5 días, pues los tiempos computacionales superaban las 3 horas sin alcanzar la solución óptima.

Mediante el uso del modelo dinámico, que admite reprogramaciones periódicas, se ha resuelto un ejemplo real que comprende el sistema de transporte más importante de la industria petrolera brasileña. Se trata de un poliducto de transmisión que abastece a la ciudad de Brasilia y a otros cuatro destinos intermedios, desde la refinería de Paulínia (la mayor del país). La tubería se extiende a lo largo de un trayecto de casi 1000 km, desde el Estado de São Paulo hasta la ciudad capital del Brasil.

VII.2.3 Operación de Poliductos con Múltiples Fuentes y Destinos

Uno de los logros más destacados del presente estudio ha sido desarrollar la primera formulación matemática de escala continua para la programación operativa de poliductos troncales, con múltiples puntos de ingreso de combustibles (ver Figura VII.3). El modelo de transporte secuencial descrito en detalle a lo largo del Capítulo V (ver Anexo III) constituye una herramienta muy útil para programar las operaciones en poliductos comunes o “common-carriers”. En estos sistemas de transporte, diferentes empresas de refino comparten la utilización de una misma tubería para movilizar sus propios productos. A continuación, se enumeran los puntos salientes del nuevo enfoque:

- (c1) Es particularmente valioso para el “scheduling” de poliductos principales, con flujo unidireccional, que transportan combustibles producidos por más de una destilería desde regiones de gran capacidad de extracción y refino de crudos (e.g., el golfo de México, en los EE.UU.) hacia destinos alejados, próximos a las zonas de mayor consumo (e.g., la ciudad de Nueva York, en la costa este de los EE.UU.).

- (c2) Por medio de una estructura MILP soportada por un enfoque continuo en tiempo y volumen, ha sido posible programar eficientemente las operaciones de impulsión y distribución de combustibles, logrando maximizar el nivel de utilización del recurso y reducir los costos de bombeo y reprocesamiento de interfases.

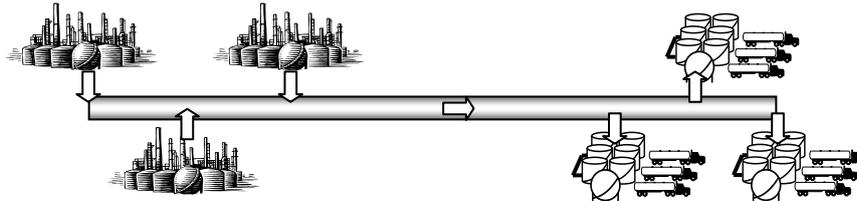


Figura VII.3. Poliducto Simple con Múltiples Fuentes y Destinos

- (c3) La inserción de nuevos lotes en estaciones intermedias del recorrido exige desacoplar el ordenamiento cronológico de las ejecuciones respecto de la secuencia de lotes transportados.
- (c4) Para cada ejecución del programa de bombeo, el modelo especifica cuál es la fuente de suministro desde donde parten los envíos.
- (c5) La operación de poliductos compartidos por más de una fuente de ingreso impone el ordenamiento secuencial de las inyecciones, que deben desarrollarse en una única terminal por vez.
- (c6) El enfoque maneja con solvencia el programa de inyección de productos en ambos modos operativos: *segregado* y *fungible*.
- (c7) En poliductos que operan en modo fungible, el modelo facilita la ejecución de inyecciones intermedias para incrementar el tamaño de lotes en tránsito, sin generar nuevas interfases en la secuencia de combustibles.
- (c8) Basado en la idea de desvincular un conjunto de otro, el modelo respeta el ordenamiento de los lotes dentro de la tubería, reservando elementos vacíos (de dimensión nula) que se desplazan en el tren de envíos, para inyectar nuevos “batches” en estaciones intermedias.

- (c9) La misma asignación de productos al conjunto ordenado de lotes simplifica la tarea de estimar las pérdidas por interfases.
- (c10) El enfoque aplicado limita el crecimiento de las dimensiones del modelo respecto de representaciones de poliductos con ingreso único, mientras que el costo computacional del proceso resolutivo se mantiene en valores aceptables.

La formulación propuesta fue aplicada con éxito a un poliducto “common-carrier” que transporta tres combustibles distintos desde dos unidades de refino hacia tres terminales de recepción. Al comparar ambos modos operativos (segregado y fungible) sobre el mismo ejemplo, se ha podido demostrar la importancia de consolidar envíos a través de inyecciones parciales en estaciones intermedias para reducir la degradación y el reprocesamiento de productos.

VII.2.4 Operación de Redes de Poliductos Interconectados

El último avance en la programación de sistemas de transporte de combustibles a través de poliductos se ha enfocado a la operación coordinada de una red de tuberías con estructura serial (ver Figura VII.4). La extensión del modelo original de poliductos con múltiples ingresos, permitiendo la impulsión simultánea de productos en más de un nodo-fuente, ha resultado en una formulación matemática MILP superadora (ver Anexo IV). El nuevo enfoque continuo, presentado hacia el final de la tesis, demuestra logros importantes en la gestión efectiva de las redes de poliductos:

- (d1) Se ha podido resolver, por primera vez a través de un enfoque continuo, la programación de operaciones de una red de poliductos interconectados en una estructura serial.
- (d2) El modelo permite hallar en un único paso las secuencias óptimas de inyección de productos, el tamaño de los envíos, la distribución o “corte” de los lotes hacia los centros de recepción y el caudal de bombeo, en múltiples poliductos que operan en simultáneo.
- (d3) Para evitar la incompatibilidad entre las inyecciones simultáneas de productos, el modelo incluye restricciones matemáticas sencillas que impiden la interferencia de los flujos de material.

- (d4) De este modo, se previene la superposición de efectos de impulsión y transferencia de lotes en la sección de ingreso de toda tubería interconectada a la red.

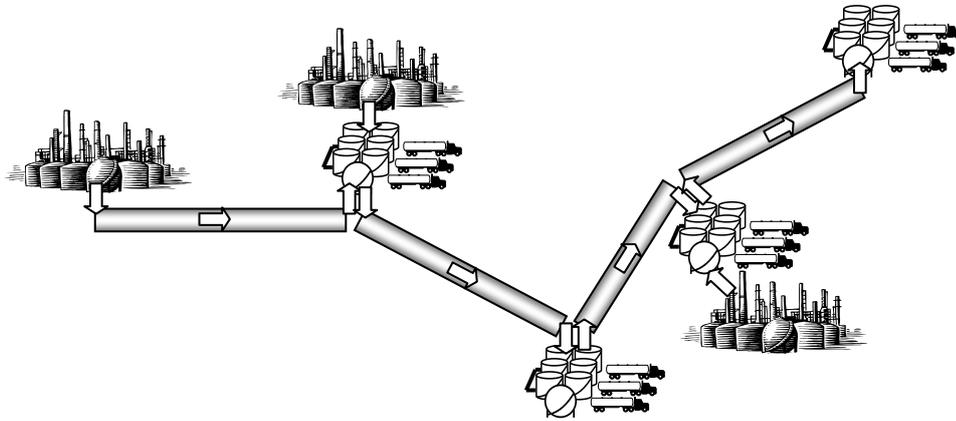


Figura VII.3. Red de Poliductos Interconectados

- (d5) El desarrollo de impulsiones simultáneas tiende a la maximización del uso de las tuberías, logrando acotar el tiempo requerido para completar el abastecimiento de los productos.
- (d6) El enfoque de operaciones simultáneas incrementa la posibilidad de atender a todos los destinos en tiempo y forma, activando tramos aislados de tuberías que no interactúan.
- (d7) En términos económicos, los beneficios obtenidos se sustentan en un incremento notable del nivel de servicio al cliente.
- (d8) El modelo es capaz de coordinar eficazmente las operaciones de carga y descarga de productos en terminales intermedias con doble propósito. Mientras se recibe un lote de combustible para su distribución local, otro producto distinto se inyecta en la misma terminal hacia destinos posteriores.
- (d9) Comparado con el modelo secuencial, el desempeño del enfoque de inyecciones simultáneas es muy superior.
- (d10) Manteniendo el modelo las mismas dimensiones, el número de ejecuciones planeadas se eleva un 50%, y el tiempo de CPU se reduce por un factor cercano a 5.

- (d11) A través de una coordinación efectiva de los flujos de inyección y descarga de combustibles en cada poliducto de la red, el aprovechamiento de la capacidad de transporte instalada se eleva del 57% al 81%.
- (d12) El volumen promedio transportado a todas las terminales del sistema puede incrementarse en más de 4700 m³ por día, en una red de poliductos de dimensiones reales.

Si bien el modelo está limitado a la operación de tuberías con flujo unidireccional, la mayor parte de las líneas de transporte extendidas sobre grandes territorios operan en un único sentido. El potencial que demuestra el modelo propuesto para resolver programas de transporte en configuraciones más complejas, ha posibilitado el abordaje de una parte importante de la red argentina de poliductos. Este logro constituye un paso trascendental hacia el mejor aprovechamiento de los recursos logísticos con los que cuenta el país, que permitirá además evaluar la probable necesidad de ampliación de la capacidad instalada. No obstante, es oportuno aclarar que el caso de estudio planteado en el Capítulo VI se basa en datos aproximados, y la programación detallada de la red requerirá del aporte de desarrollos y herramientas complementarias, tal como se remarca en la sección siguiente.

VII.3 Nuevos Desafíos en la Programación de Poliductos

Debe reconocerse que en problemas extremadamente grandes como los que se presentan en la práctica, contando incluso con herramientas computacionales cada vez más efectivas, es muchas veces imposible resolver en un solo paso la programación pormenorizada de todos los aspectos que hacen a la operación integral de estos sistemas. Es común recurrir entonces a técnicas de descomposición del problema en partes más simples. Algunas de las estrategias que se han propuesto en este trabajo comprenden la división parcial del horizonte temporal y la revisión periódica del plan de transporte.

Otra forma efectiva de descomponer el problema es el planteo de un enfoque jerárquico para la toma de decisiones. Estas técnicas son particularmente útiles cuando los subproblemas de nivel superior no interfieren con las decisiones principales del nivel inferior (problemas separables). En efecto, los modelos presentados a lo largo de la tesis abordan

el dimensionamiento y la secuenciación de los lotes de combustible, pero no resuelven en el mismo paso la configuración de las estaciones de bombeo puestas en marcha para lograrlo. Normalmente, las empresas delegan ambas instancias del problema a dos sectores distintos de la organización: Planeación y Operaciones. Lo propio ocurre con el programa detallado de despachos hacia las terminales de carga, en sistemas con múltiples destinos. La posibilidad de realizar entregas “al paso”, mientras el lote continúa su recorrido, es una operación detallada que podrá resolverse en programas de menor nivel.

Por último, la representación de redes de poliductos interconectados en estructuras seriales constituye tan solo el primer paso hacia la resolución integral de las cadenas de abastecimiento reales. Una de las limitaciones del modelo propuesto es la adopción de un mismo rango de caudales para todos los tramos de tubería que conforman la red. Si bien el caudal de inyección puede ajustarse a las condiciones de la terminal que impulsa cada lote, es inexorable el control riguroso del flujo de transporte tramo por tramo, según el diámetro de los ductos y las estaciones de bombeo dispuestas a lo largo del recorrido. Estas y otras áreas de desarrollo forman parte de los trabajos futuros a realizar dentro de la actual línea de investigación.

VII.4 Áreas de Desarrollo Futuro

Unos pocos trabajos han puesto énfasis en la planeación de redes interconectadas por poliductos, con nodos de ramificación y concentración del flujo de combustibles. Cada vez que un lote de producto alcanza el final de una tubería, suele estar expuesto a múltiples alternativas: (a) descargar parte de su contenido en tanques de la terminal receptora, (b) transferirse en forma directa a tramos subsiguientes, (c) bifurcarse en tuberías laterales, (d) recibir material adicional provisto por la terminal alcanzada, (e) coleccionar combustible proveniente de una tubería lateral y continuar su recorrido hacia otros destinos, o (f) combinar las operaciones (a) a (e). Más aún, existen pares de nodos interconectados por varios conductos que operan en uno u otro sentido, y tuberías que permiten el flujo bidireccional de combustibles entre refinerías y puertos poco distantes. En síntesis, el problema reviste una complejidad extrema, y las metodologías de resolución propuestas en la literatura son técnicas aproximadas que demuestran una notoria incapacidad para

encontrar buenas soluciones cuando el punto de partida es deficiente. En ese contexto, algunas de las áreas de mayor interés involucran:

- (i) *La programación del transporte de combustibles a través de poliductos secundarios.* Estas configuraciones “laterales” buscan vincular a los grandes centros de recepción o distribución de productos con puntos de consumo alejados, como terminales de carga de camiones o aeropuertos, a través de conductos de diámetro menor (ver Figura VII.4).

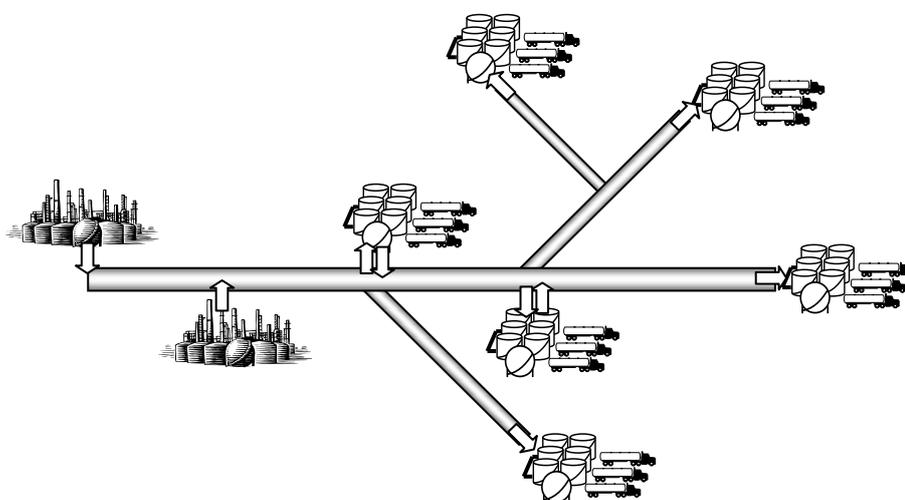


Figura VII.4. Red de Distribución de Combustibles por Poliductos en Árbol

- (ii) *La planeación de operaciones en “gathering lines”.* En forma análoga, es necesario coordinar los flujos provenientes de diversas refinерías a través de ductos más pequeños, que convergen a los nodos de ingreso de una línea principal (ver Figura VII.5). La representación rigurosa del programa de “recolección” de combustibles es un problema de gran interés industrial, que aún no ha sido resuelto.
- (iii) *El modelado de redes de tuberías altamente interconectadas.* La programación simultánea de operaciones en poliductos troncales y secundarios, a través de modelos MILP de escala continua, es el mayor desafío hacia la resolución global de redes de suministro más complejas. La principal dificultad radica en la interrelación de los flujos de ingreso y egreso de material en el tiempo. Cada terminal de

tanques puede operar como un nodo de inyección y/o recepción de combustibles, y su funcionamiento debe estar perfectamente acoplado a la operación del resto de los nodos logísticos que componen la red.

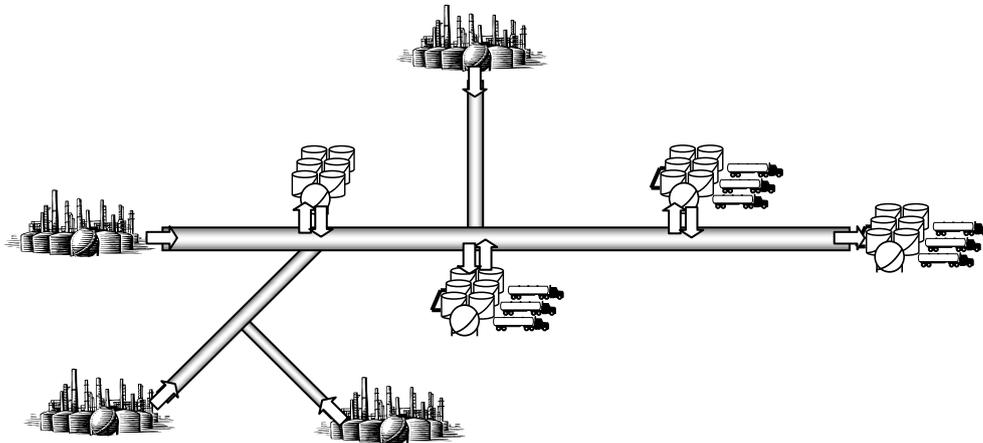


Figura VII.5. Red de Concentración de Combustibles por Polductos en Árbol

Paralelamente, se ha encontrado que las operaciones detalladas de descarga hacia los centros de demanda juegan un rol preponderante en la optimización del funcionamiento de bombas y otros dispositivos del sistema. Los modelos presentados en esta tesis permiten obtener el plan de inyección y distribución de productos desde/hacia las distintas terminales del polducto, aunque no especifican en detalle el orden en que se producen las entregas. En general, existen diversas alternativas para llevar a la práctica el plan. Una operación habitual es realizar entregas “al paso” en depósitos intermedios a los que el lote tiene acceso, mientras el mismo “batch” continúa su recorrido hacia destinos posteriores. Otra operación muy común es la interrupción del despacho de un lote para dar lugar a la derivación de otro más prioritario, en una terminal distinta. Como resultado, el despacho de una orden suele dividirse en múltiples entregas parciales. Estas y otras decisiones se dejan libradas al criterio del operador de la línea, quien debe poner especial cuidado en la factibilidad práctica del programa, evitando efectuar un despacho que luego impida la realización de otro. Las decisiones de este nivel se orientan a optimizar la operación del conjunto de válvulas y unidades de impulsión de la red de polductos, a partir del programa de corridas de bombeo establecido por el planificador con la ayuda de las herramientas descritas en esta tesis.

Por su parte, las técnicas de simulación permiten obtener modelos del sistema de transporte con mayor nivel de detalle, alcanzando representaciones más ajustadas al comportamiento real, sin exceder los tiempos de resolución admisibles en la práctica. La simulación posibilita el análisis y experimento de sistemas reales sin necesidad de interrumpir la operación de los mismos. Asimismo, facilita el estudio de los efectos de cambios y eventos imprevistos, evaluando así la respuesta del sistema frente a ellos. En ese ámbito, se abren nuevos horizontes de investigación referidos a:

- (iv) La programación y simulación detallada de los despachos de productos hacia las terminales receptoras.
- (v) La minimización del número de detenciones y arranques parciales de cada tramo de tubería, que determinan vectores de costo muy importantes asociados a las pérdidas de carga, la vida útil y el mantenimiento de cada componente motriz.
- (vi) La optimización del caudal de transporte de los combustibles, teniendo en cuenta la configuración de bombas en las estaciones impulsoras y su curva de rendimiento.
- (vii) La evaluación de múltiples alternativas operacionales a nivel de planeación detallada. A partir de una rápida visualización de los envíos dentro de la tubería, es posible implementar procedimientos de tipo “*what if...*”, que facilitan la intervención del programador del sistema de transporte en decisiones clave para el mejoramiento de las soluciones. De esta manera, pueden incorporarse al modelo decisiones todavía más específicas, que por simplicidad han sido ignoradas. Entre ellas, la determinación del perfil de presiones a lo largo de la tubería.
- (viii) La validación de los programas de inyección y descarga de combustibles, evaluando su comportamiento frente a diferentes escenarios estocásticos, generados en forma aleatoria mediante el simulador de eventos discretos.
- (ix) La optimización detallada del “schedule”. Teniendo en cuenta la información que proveen los programas de inyección y descarga obtenidos con las herramientas propuestas en esta tesis, es posible recurrir al uso de procedimientos de búsqueda avanzada, como los

algoritmos genéticos, para el mejoramiento local de las soluciones dentro de un conjunto limitado de alternativas.

- (x) La obtención de reglas simples, que permitan determinar programas eficientes de descarga, en forma sencilla y en tiempos acotados. A ese fin, se buscará establecer el orden de prioridades más conveniente para la atención de las terminales de recepción del poliducto.

Por último, los modelos matemáticos presentados a lo largo de esta tesis corresponden al área de optimización determinística, donde todos los parámetros del problema son conocidos con certeza, aunque sea su valor medio. Sin embargo, datos estimados como la demanda de productos en las diferentes terminales del sistema de transporte por poliductos representan información a futuro, que incorporan incertidumbre al problema. Una de las herramientas útiles para considerar explícitamente la incertidumbre es la optimización estocástica. Se parte de suponer que los valores de la demanda futura son desconocidos, pero existe una distribución de probabilidades, en general discreta, con un número finito de estados posibles a los que se denomina escenarios.

Dentro del área de optimización estocástica, el problema de planeación operativa de poliductos involucra decisiones de tipo “*aquí y ahora*”, normalmente vinculadas al programa de inyección de lotes en el sistema. Este tipo de decisiones deben tomarse en base a información aproximada dada a priori, sobre situaciones particulares con futuro incierto. Una vez que el tiempo transcurre y las variables aleatorias (demandas de productos) adoptan definitivamente uno de los estados posibles, el problema de planeación operativa de poliductos afronta una segunda instancia, donde se adoptan acciones correctivas, que mitigan los efectos de los sucesos aleatorios sobre las decisiones primarias. En particular, el programa detallado de descarga de lotes entre las terminales receptoras corresponde a decisiones de este segundo nivel. Las posibles áreas de desarrollo consisten en:

- (xi) Modelar los problemas típicos de planeación del transporte por poliductos a través de *programación lineal estocástica bietapa*. Las decisiones de la primera etapa (programa de inyección o “input schedule”) no pueden modificarse en función del escenario que realmente ocurra en el futuro. En ese momento, los lotes de

producto, con secuencia y tamaño establecidos, ya transitan por el interior de la tubería. Las decisiones de la segunda etapa (programa de descarga o “output schedule”) se adoptan a posteriori, una vez conocido el valor que asumen los parámetros estocásticos según el escenario que efectivamente se presenta.

- (xii) Evaluar la robustez de las soluciones, buscando que el “schedule” propuesto se mantenga factible en todos los escenarios. A través de la *optimización robusta* del problema, se encontraría un equilibrio simultáneo entre los objetivos de optimalidad y factibilidad frente a todas las posibilidades.

Sin embargo, claro está, estas variantes incrementarán en forma exponencial el tamaño del modelo.

Anexos

Anexo I

Modelo de Programación de Poliductos con un Único Origen y un Único Destino

Minimizar:

$$z = \rho \left(h_{\max} - \sum_{i \in I^{new}} L_i \right) + \sum_{p \in P} \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p \\ i > 1}} \sum_{i \in I} cf_{p,p'} WIF_{i,p',p} + \\ \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} cid_{p,t} (dd_t - dd_{t-1}) IA_{p,t} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} cb_{p,t} B_{p,t}$$

Sujeto a:

Definición del Combustible Transportado

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (1)$$

$$|I^{new}| = \sum_{p \in P} \frac{1}{\langle b \rangle_p} (\sum_{t \in T} dem_{p,t}) \quad (2)$$

Secuenciación de Envíos

$$C_i - L_i \geq C_{i-1} + \tau_{p,p'} (y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1) \quad \forall i \in I^{new}; p, p' \in P \quad (3)$$

$$L_i \leq C_i \leq h_{\max} \quad \forall i \in I^{new} \quad (4)$$

Duración de las Ejecuciones

$$\sum_{p \in P} l_{\min,p} y_{i,p} \leq L_i \leq \sum_{p \in P} l_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (5)$$

$$l_{\min,p} = \frac{Q_{\min,p}}{vb_p} \quad ; \quad l_{\max,p} = \frac{Q_{\max,p}}{vb_p} \quad \forall p \in P \quad (6)$$

Ejecuciones Ficticias

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (7)$$

Volumen Contenido en los Lotes

$$QP_{i,p} \leq Q_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i,p} = Q_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$LP_{i,p} = \left(\frac{1}{vb_p} \right) QP_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P \quad (10)$$

$$L_i = \sum_{p \in P} LP_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}$$

Volumen de las Interfases entre "Batches" Consecutivos

$$WIF_{i,p,p'} \geq IF_{p,p'}(y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1) \quad \forall i \in I, i > 1, p \neq p' \in P \quad (11)$$

Secuencias de Productos No Permitidas

$$y_{i-1,p} + y_{i,p^*} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new}, (p, p^*) \text{ incompatible} \quad (12)$$

Detenciones Programadas

$$C_i \leq s_\lambda + (h_{\max} - s_\lambda) w_{i,\lambda} \quad \forall i \in I^{new}, \lambda \in L \quad (13)$$

$$C_i - L_i \geq e_\lambda w_{i,\lambda} \quad \forall i \in I^{new}, \lambda \in L \quad (14)$$

$$w_{i,\lambda+1} \leq w_{i,\lambda} \quad ; \quad w_{i-1,\lambda} \leq w_{i,\lambda} \quad \forall i \in I^{new}, \lambda \in L \quad (15)$$

Seguimiento de los Envíos

$$F_i^{(i')} = \sum_{\lambda=i}^{i'} Q_\lambda \quad \forall i, i' \in I^{new} (i \leq i') \quad (16)$$

$$F_i^{(i')} = F_i^o + \sum_{\substack{\lambda \in I^{new} \\ \lambda \leq i'}} Q_\lambda \quad \forall i \in I^{old}, i' \in I^{new} \quad (17)$$

Abastecimiento de Combustibles a la Estación Terminal

$$D_{\min} x_i^{(i')} \leq D_i^{(i')} \leq D_{\max} x_i^{(i')} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i \leq i') \quad (18)$$

$$D_i^{(i')} \leq F_i^{(i')} - \sigma x_i^{(i')} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i \leq i') \quad (19)$$

$$\sum_{\substack{i' \in I^{new} \\ i \leq i'}} D_i^{(i')} \leq Q_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (20)$$

$$\sum_{i' \in I^{new}} D_i^{(i')} \leq Q_i \quad \forall i \in I^{old} \quad (21)$$

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} D_i^{(i')} = Q_i, \quad \forall i' \in I^{new} \quad (22)$$

Arribo de Lotes a la Estación Terminal

$$AT_i \geq (C_i - L_i) + G_i^{(i)} - H(1 - x_i^{(i)}) \quad \forall i \in I, i < |I|, i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (23)$$

$$G_i^{(i)} \geq \frac{1}{vb_p} \left[\sigma y_{i',p} - F_{i+1}^{(i-1)} - (Q_i - \sum_{\substack{\lambda=i \\ \lambda \in I^{new}}} D_i^{(\lambda)}) \right] \quad (24)$$

$\forall i \in I, i' \in I^{new} (i < i'), p \in P$

Secuenciación de los Tiempos de Arribo

$$AT_i \geq AT_{i-1} + \left(\frac{Q_i}{\max_{p \in P} (vb_p)} \right) \quad \forall i \in I (i > 1) \quad (25)$$

Identificación del Periodo de Arribo

$$\sum_{t \in T} dd_{t-1} r_{i,t} \leq AT_i \leq \sum_{t \in T} dd_t r_{i,t} \quad \forall i \in I \quad (26)$$

$$\sum_{t \in T} r_{i,t} = \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I \quad (27)$$

Control Diario de los Niveles de Inventario en la Estación Terminal

$$\sum_{p \in P} QA_{i,p,t} \leq Q_{\max,p} r_{i,t} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{t \in T} QA_{i,p,t} = QP_{i,p} - \sum_{p' \neq p} WIF_{i,p,p'} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (29)$$

$$IA_{p,t} = IA_{p,t-1} + \sum_{i \in I} QA_{i,p,t} - dem_{p,t} - B_{p,t-1} + B_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (30)$$

$$(IA_{\min})_p \leq IA_{p,t} \leq (IA_{\max})_p \quad \forall p \in P, t \in T \quad (31)$$

Ajuste del Tamaño de los Envíos

$$\sum_{s \in S_p} v_{i,s} = y_{i,p} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (32)$$

$$QP_{i,p} = \sum_{s \in S_p} b_s v_{i,s} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (33)$$

$$Q_i = \sum_{p \in P} QP_{i,p} = \sum_{p \in P} \sum_{s \in S_p} b_s v_{i,s} \quad \forall i \in I \quad (34)$$

Tareas de Aprobación de Lotes

$$RT_i = AT_i + \sum_{p \in P} st_p y_{i,p} \quad \forall i \in I \quad (35)$$

$$\sum_{t \in T} dd_{t-1} rs_{i,t} \leq RT_i \leq \sum_{t \in T} dd_t rs_{i,t} \quad \forall i \in I \quad (36)$$

$$\sum_{t \in T} rs_{i,t} = \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I \quad (37)$$

$$\sum_{p \in P} QR_{i,p,t} \leq Q_{\max,p} rs_{i,t} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (38)$$

$$\sum_{t \in T} QR_{i,p,t} = QP_{i,p} - \sum_{p' \neq p} WIF_{i,p,p'} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (39)$$

$$ID_{p,t} = ID_{p,t-1} + \sum_{i \in I} QR_{i,p,t} - dem_{p,t} - B_{p,t-1} + B_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (40)$$

$$(ID_{\min})_p \leq ID_{p,t} \leq (ID_{\max})_p \quad \forall p \in P, t \in T \quad (41)$$

*Caudal de Transporte Fijo para Todos los Productos**

$$L_i = \left(\frac{1}{vb} \right) Q_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (42)$$

$$AT_i \geq (C_i - L_i) + \frac{\sigma - F_{i+1}^{(i-1)}}{vb} - H(1 - x_i^{(i)}) \quad \forall i \in I, i < |I|, i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (43)$$

$$AT_i \geq AT_{i-1} + L_i \quad \forall i \in I (i > 1) \quad (44)$$

Caudal de Transporte Variable†

$$\sum_{s \in S_p} \frac{b_s}{vb_{\max}} v_{i,s} \leq LP_{i,p} \leq \sum_{s \in S_p} \frac{b_s}{vb_{\min}} v_{i,s} \quad (45)$$

* Reemplazan las Ecuaciones (10), (23), (24) y (25)

† Reemplaza la Ecuación (10)

Anexo II

Modelo de Programación de Poliductos con un Único Origen y Múltiples Terminales de Recepción

Minimizar:

$$\begin{aligned}
 z = & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \left(cp_{p,j} \sum_{i \in I} \sum_{i' \in I^{new}} DP_{p,i,j}^{(i')} \right) + \psi PH \\
 & + \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p}} \sum_{\substack{i \in I \\ i > 1}} cf_{p,p'} WIF_{i,p,p'} + \rho \left(hw_{\max} + PH - \sum_{i \in I^{new}} L_i \right) \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} cb_{p,j,t} B_{p,j,t} + \frac{1}{|I^{new}|} \sum_{p \in P} \left[\sum_{j \in J_p} cid_{p,j} \sum_{i' \in I^{new}} ID_{p,j}^{(i')} + cir_p \sum_{i' \in I^{new}} IRS_p^{(i')} \right]
 \end{aligned}$$

Sujeto a:

Asignación de Combustible

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (1)$$

Secuencia de Ejecuciones

$$C_i - L_i \geq C_{i-1} + \tau_{p,p'} (y_{i-1,p'} + y_{i,p} - 1) \quad \forall i \in I^{new}; p, p' \in P \quad (2)$$

$$L_i \leq C_i \leq h_{\max} \quad \forall i \in I^{new} \quad (3)$$

Tamaño de un Lote a Inyectar y Duración de la Corrida de Bombeo Asociada

$$vb_{\min} L_i \leq Q_i \leq vb_{\max} L_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} l_{\min,p} \leq L_i \leq \sum_{p \in P} y_{i,p} l_{\max,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (6)$$

Volumen de Interfase entre Lotes Consecutivos

$$WIF_{i,p,p'} \geq IF_{p,p'} (y_{i-1,p} + y_{i,p'} - 1) \quad \forall i \in I, i > 1, p, p' \in P \quad (7)$$

Secuencias Incompatibles

$$y_{i-1,p} + y_{i,p^*} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new}, (p, p^*) \text{ incompatible} \quad (8)$$

Consumo de Energía en Horas Pico

$$\sum_{i \in I^{new}} Q_i \leq vb_{\max} (hw_{\max} + PH) \quad (9)$$

Períodos de Inyección de cada Lote

$$\sum_{t \in T} w_{i',t} = \sum_{p \in P} y_{i',p} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (10)$$

$$C_{i'} \geq dd_{t-1} w_{i',t} \quad (11)$$

$$C_{i'} \leq dd_t + (1 - w_{i',t}) (h_{\max} - dd_t) \quad \forall i' \in I^{new}, t \in T \quad (12)$$

Ubicación de los Lotes dentro del Poliducto

$$F_{i+1}^{(i')} + W_i^{(i')} = F_i^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i \quad (13)$$

Disposición de un Nuevo Lote en la Tubería

$$Q_i = W_i^{(i')} + \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i')} \quad ; \quad F_i^{(i')} - W_i^{(i')} = 0 \quad \forall i \in I^{new} \quad (14)$$

Despacho de Material en Corridas Posteriores

$$W_i^{(i')} = W_i^{(i'-1)} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i \quad (15)$$

Condiciones de Accesibilidad de "Batches" a Terminales

$$D_{\min} x_{i,j}^{(i')} \leq D_{i,j}^{(i')} \leq D_{\max} x_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j \in J \quad (16)$$

$$F_i^{(i')} - \sum_{p \in P} \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p}} WIF_{i,p,p'} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j < |J| \quad (17)$$

$$F_i^{(i')} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, j = |J|$$

$$F_i^{(i'-1)} - W_i^{(i'-1)} + \sum_{j'=1}^j D_{i,j'}^{(i')} \leq \sigma_j + (\sigma_{|J|} - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(i')}) \quad (18)$$

$$\forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j \in J$$

Límite de Material Disponible para Despacho

$$\sum_{j < |J|} D_{i,j}^{(i')} \leq W_i^{(i'-1)} - \sum_{\substack{p \in P \\ p' \in P \\ p' \neq p}} WIF_{i,p,p'} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i$$

$$\sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i')} \leq W_i^{(i'-1)} \quad \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i$$
(19)

Balace de Ingreso/Egreso de Combustibles

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(i')} = Q_{i'} \quad \forall i' \in I^{new}$$
(20)

Despacho de Combustibles hacia el Mercado

$$DM_{p,j}^{(i)} \leq (C_i - C_{i-1}) vm_{p,j} \quad \forall p \in P, \forall j \in J_p, \forall i \in I^{new}$$
(21)

Cumplimiento de las Fechas de Entrega Pactadas

$$\sum_{\substack{\lambda=1 \\ \lambda \in I^{new}}}^i DM_{p,j}^{(\lambda)} \geq \left(\sum_{k=1}^t dem_{p,j,k} (w_{i',t} - w_{i'+1,t}) \right) - B_{p,j,t} + B_{p,j,(t-1)}$$

$$\forall p \in P, j \in J_p, t \in T, i' \in I^{new}$$
(22)

$$\sum_{i \in I^{new}} w_{i,t} \geq 1 \quad \forall t \in T$$
(23)

Cantidad de Combustible Transferido desde la Línea

$$DP_{i,j,p}^{(i')} \leq D_{\max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new}$$
(24)

$$\sum_{p \in P} DP_{i,j,p}^{(i')} = D_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, j \in J_p, i' \in I^{new}$$
(25)

$$DP_{i,j,p}^{(i')} = D_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I^{old}, p \in P_i, j \in J_p, i' \in I^{new}$$
(26)

Niveles de Stock Permitidos

$$ID_{p,j}^{(i')} = ID_{p,j}^{(i'-1)} + \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} DP_{i,j,p}^{(i')} - DM_{p,j}^{(i')} \quad \forall p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new}$$
(27)

$$(ID_{\min})_{p,j} \leq ID_{p,j}^{(i')} \leq (ID_{\max})_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J_p, i' \in I^{new}$$
(28)

Campañas de Refino de Combustibles

$$a_r zl_{i,r} \leq C_i \leq a_r + h_{\max} zl_{i,r} \quad \forall i \in I^{new}, r \in R$$
(29)

$$b_r zu_{i,r} \leq C_i - L_i \leq b_r + h_{\max} zu_{i,r} \quad \forall i \in I^{new}, r \in R \quad (30)$$

Volumen Producido en Refinería y Descargado en la Estación Cabecera

$$SL_{i,r} \leq q_r zl_{i,r} \quad (31)$$

$$SL_{i,r} \leq vp_r (C_i - a_r zl_{i,r}) \quad \forall i \in I^{new}, r \in R \quad (32)$$

$$SU_{i,r} \geq q_r zu_{i,r} \quad (33)$$

$$SU_{i,r} \geq vp_r [(C_i - L_i) - a_r - h_{\max} zu_{i,r}] \quad \forall i \in I^{new}, r \in R \quad (34)$$

Stock Mínimo/Máximo de Combustibles en la Estación Cabecera

$$IRF_p^{(i)} = IR_p^o + \sum_{r \in Rp} SL_{i,r} - \sum_{\substack{i' \in I^{new} \\ i' \leq i}} QP_{i',p} \geq (IR_{\min})_p \quad (35)$$

$$\forall i \in I^{new}, p \in P$$

$$IRS_p^{(i)} = IR_p^o + \sum_{r \in Rp} SU_{i,r} - \sum_{\substack{i' \in I^{new} \\ i' < i}} QP_{i',p} \leq (IR_{\max})_p \quad (36)$$

$$\forall i \in I^{new}, p \in P$$

$$QP_{i',p} \leq Q_{\max,p} y_{i',p} \quad \forall i' \in I^{new}, p \in P \quad (37)$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i',p} = Q_{i'} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (38)$$

Condiciones de Partida

$$F_i^{(i'-1)} = F_i^o \quad \forall i \in I^{old}, i' = first(I^{new}) \quad (39)$$

$$W_i^{(i'-1)} = W_i^o \quad \forall i \in I^{old}, i' = first(I^{new}) \quad (40)$$

Anexo III

Modelo de Programación de Poliductos con Múltiples Puntos de Ingreso de Combustibles

Minimizar:

$$z = \rho(h_{\max} - \sum_{k \in K} L_k) + \sum_{i \in I} TC_i + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} cin_{p,s} QP_{i,s,p}^{(k)} + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} cb_{p,j} B_{p,j}$$

Sujeto a:

Secuencia de Ejecuciones

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall k \in K (k > 1) \quad (1)$$

$$C_k \leq h_{\max} \quad \forall k \in K \quad (2)$$

Asignación de Corridas de Bombeo a "Batches" y Terminales de Ingreso

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

Dimensionamiento de las Inyecciones

$$Q_{\min} w_{i,s}^{(k)} \leq Q_{i,s}^{(k)} \leq Q_{\max} w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (4)$$

Duración de las Ejecuciones

$$vb_{\min,s} L_{k,s} \leq \sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)} \leq vb_{\max,s} L_{k,s} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (5)$$
$$L_k = \sum_{s \in S} L_{k,s} \quad \forall k \in K$$

Monitoreo del Tamaño de los Envíos

$$W_{i,k} = W_{i,k-1} + \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (6)$$

Seguimiento de la Posición de los Lotes en el Tiempo

$$F_{i,k} - W_{i,k} = F_{i+1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (7)$$

$$F_{i,k-1} \leq F_{i,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (8)$$

$$D_{i,j}^{(k)} \leq \sum_{s/\tau_s < \sigma_j} \sum_{i' \in I} Q_{i',s}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (9)$$

$$F_{i,k} \leq PV \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$F_{i,k} - W_{i,k} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (11)$$

Balance Volumétrico Alrededor del Poliducto

$$\sum_{i \in I} W_{i,k} = PV \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (13)$$

Abastecimiento de Material a un Lote Preexistente

$$F_{i,k-1} \geq \tau_s w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (14)$$

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \tau_s + (PV - \tau_s)(1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (15)$$

Transferencia de Material desde los Lotes en Tránsito

$$D_{\min} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq D_{\max} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (16)$$

$$F_{i,k} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (17)$$

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \sigma_j + (PV - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{j'=1}^j D_{i,j'}^{(k)} \leq \sigma_j - (F_{i,k-1} - W_{i,k-1}) + \sum_{\tau_s < \sigma_j} Q_{i,s}^{(k)} + (PV - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad (19)$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K$$

Asignación de Productos a "Batches"

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (20)$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} w_{i,s}^{(k)} \leq |K| \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (21)$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} \ (i > 1) \quad (22)$$

Cantidad de Producto Inyectado en la Línea por Corrida

$$Q_{\min,p} y_{i,p} \leq \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} QP_{i,s,p}^{(k)} \leq Q_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new}, p \in P \quad (23)$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i,s,p}^{(k)} = Q_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (24)$$

Volumen de Producto p Transferido desde la Línea a los Depósitos

$$\sum_{k \in K} DP_{i,j,p}^{(k)} \leq D_{\max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P \quad (25)$$

$$\sum_{p \in P} DP_{i,j,p}^{(k)} = D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (26)$$

Suministro de Combustible desde un Nodo de Ingreso

$$SL_{p,s} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} QP_{i,s,p}^{(k)} \leq SU_{p,s} \quad \forall p \in P, s \in S \quad (27)$$

Cumplimiento de las Demandas en cada Centro de Recepción

$$DL_{p,j} - B_{p,j} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} DP_{i,j,p}^{(k)} \leq DU_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J \quad (28)$$

Costo de Interfases

$$TC_i \geq cif_{p,p'} (y_{i,p} + y_{i+1,p'} - 1) \quad \forall i \in I, (p \neq p') \in P \quad (29)$$

Disposición Inicial de Envíos

$$F_{i,k-1} = \sum_{\substack{i' \geq i \\ i' \in I^{old}}} W_{i'}^o \quad \forall i \in I^{old}, k = 1 \quad (30)$$

$$y_{i,p} = 1 \quad \forall i \in I^{old}, p = P_i \quad (31)$$

Anexo IV

Modelo de Programación de Redes de Poliductos Coordinados

Minimizar:

$$z = \sum_{i \in I} TC_i + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} cin_{p,s} Q_{i,s,p}^{(k)} + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} cb_{p,j} B_{p,j}$$

Sujeto a:

Secuenciación de Bloques de Corridas Paralelas

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall k \in K \ (k > 1) \quad (1)$$

$$C_k \leq h_{\max} \quad \forall k \in K \quad (2)$$

Asignación de "Batches" a Corridas de Bombeo Individuales

$$\sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} \leq 1 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)} \leq |S| \left(\sum_{s' \in S} \sum_{i \in I} w_{i,s'}^{(k-1)} \right) \quad \forall k \in K \ (k > 1) \quad (4)$$

Dimensionamiento de las Inyecciones

$$Q_{\min,s} w_{i,s}^{(k)} \leq Q_{i,s}^{(k)} \leq Q_{\max,s} w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (5)$$

Duración de los Bloques de Corridas de Bombeo

$$vb_{\min,s} L_{k,s} \leq \sum_{i \in I} Q_{i,s}^{(k)} \leq vb_{\max,s} L_{k,s} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (6)$$

$$L_k \geq L_{k,s} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (7)$$

$$L_k \geq L_{k,s} + \varphi_s \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k-1)} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (7')$$

Evolución del Tamaño de los Envíos en el Tiempo

$$W_{i,k} = W_{i,k-1} + \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in J \\ \sigma_j \leq \tau_s}} D_{i,j}^{(k)} \leq \sum_{i \in I} \sum_{\substack{s' \in S \\ \tau_{s'} < \tau_s}} Q_{i,s'}^{(k)} \quad \forall s \in S, k \in K \quad (9)$$

Seguimiento de los Ubicación de los Lotes en el Tiempo

$$F_{i,k} - W_{i,k} = F_{i+1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$F_{i,k-1} \leq F_{i,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (11)$$

$$F_{i,k} \leq PV \quad \forall i \in I, k \in K \quad (12)$$

$$F_{i,k} - W_{i,k} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (13)$$

Balance Global Alrededor de la Red de Poliductos

$$\sum_{i \in I} W_{i,k} = PV \quad \forall k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} Q_{i,s}^{(k)} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (15)$$

Inyección de Combustibles en los Poliductos

$$F_{i,k-1} \geq \tau_s w_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (16)$$

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \tau_s + (PV - \tau_s) (1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (17)$$

Derivación de Material hacia los Centros de Recepción

$$D_{\min} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq D_{\max} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (18)$$

$$F_{i,k} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (19)$$

$$F_{i,k-1} - W_{i,k-1} \leq \sigma_j + (PV - \sigma_j) (1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{j'=1}^j D_{i,j'}^{(k)} \leq \sigma_j - (F_{i,k-1} - W_{i,k-1}) + \sum_{\substack{s \in S \\ \tau_s < \sigma_j}} Q_{i,s}^{(k)} + (PV - \sigma_j) (1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad (21)$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K$$

Condiciones de Corridas de Bombeo Compatibles

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in J \\ \sigma_j \leq \tau_s}} D_{i,j}^{(k)} \geq \sum_{i \in I} \sum_{\substack{s' \in S \\ \tau_{s'} < \tau_s}} Q_{i,s'}^{(k)} - Q_{\max} (1 - \sum_{i \in I} w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall s \in S, k \in K \quad (22)$$

*Condiciones Alternativas de Compatibilidad**

$$F_{i+1,k} \leq F_{i+1,k-1} + PV (1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S (s > 1), k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{\substack{j \in J \\ \sigma_j \leq \tau_s}} D_{i,j}^{(k)} \geq \sum_{\substack{s' \in S \\ \tau_{s'} < \tau_s}} Q_{i,s'}^{(k)} - Q_{\max} (1 - w_{i,s}^{(k)}) \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (24)$$

Asignación de Productos a "Batches"

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new} \quad (25)$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} w_{i,s}^{(k)} \leq |S||K| \sum_{p \in P} y_{i,p} \quad \forall i \in I^{new} \quad (26)$$

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p} \quad \forall i \in I^{new} (i > 1) \quad (27)$$

$$y_{i-1,p} + y_{i,p'} \leq 1 \quad \forall i \in I^{new}, i > 1 \quad (p, p') \text{ incompatible} \quad (28)$$

Cantidad de Producto Inyectado desde un Nodo-Fuente

$$QP_{i,s,p}^{(k)} \leq Q_{\max,p} y_{i,p} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K, p \in P \quad (29)$$

$$\sum_{p \in P} QP_{i,s,p}^{(k)} = Q_{i,s}^{(k)} \quad \forall i \in I, s \in S, k \in K \quad (30)$$

Volumen de Combustible p Derivado a Tanques de un Depósito

$$DP_{i,j,p}^{(k)} \leq D_{\max} y_{i,p} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P \quad (31)$$

$$\sum_{p \in P} DP_{i,j,p}^{(k)} = D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (32)$$

Disponibilidad de Combustibles en cada Fuente

$$SL_{p,s} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} QP_{i,s,p}^{(k)} \leq SU_{p,s} \quad \forall p \in P, s \in S \quad (33)$$

Satisfacción de las Demandas de Combustible en cada Destino

$$DL_{p,j} - B_{p,j} \leq \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} DP_{i,j,p}^{(k)} \leq DU_{p,j} \quad \forall p \in P, j \in J \quad (34)$$

* Reemplazan la Ecuación (22)

Costo de Interfases

$$TC_i \geq cif_{p,p'} (y_{i,p} + y_{i+1,p'} - 1) \quad \forall i \in I; p, p' \in P \quad (35)$$

Condiciones Iniciales

$$F_{i,k-1} = \sum_{\substack{i' \geq i \\ i' \in I^{old}}} W_{i'}^o \quad \forall i \in I^{old}, \quad k=1 \quad (36)$$

$$y_{i,p} = 1 \quad \text{para } p = P_i, \forall i \in I^{old} \quad (37)$$

Nomenclatura

Conjuntos

<i>I</i>	conjunto ordenado de lotes (<i>I</i>^{old} \cup <i>I</i>^{new})
<i>I</i>^{new}	nuevos lotes a introducir durante el horizonte de planeación
<i>I</i>^{old}	lotas disponibles dentro de las tuberías al iniciar el plan
<i>J</i>	terminales de recepción a lo largo de los poliductos
<i>J</i>_{<i>p</i>}	terminales de recepción que demandan combustible <i>p</i>
<i>J</i>_{<i>p,s</i>}	terminales que demandan producto <i>p</i> , provisto por la fuente <i>s</i>
<i>K</i>	conjunto ordenado de ejecuciones/bloques de inyecciones
<i>L</i>	conjunto ordenado de detenciones programadas del poliducto
<i>P</i>	conjunto de productos transportados
<i>P</i>_{<i>i</i>}	producto contenido en el lote inicialmente disponible <i>i</i> \in <i>I</i>^{old}
<i>S</i>	refinerías o fuentes de ingreso de productos a lo largo de la línea
<i>S</i>_{<i>p</i>}	tamaños de lotes posibles para envíos de producto <i>p</i>
<i>R</i>	campañas de producción programadas en la refinería
<i>T</i>	períodos en los que se divide el horizonte temporal
<i>T</i>_{HF}	períodos de tiempo con valla estricta
<i>T</i>_{SF}	períodos de tiempo con valla flexible

Parámetros

<i>a</i>_{<i>r</i>} / <i>b</i>_{<i>r</i>}	tiempo de inicio/finalización de la campaña de refino <i>r</i>
<i>b</i>_{<i>s</i>}	tamaño o volumen de la alternativa <i>s</i>
<i>cb</i>_{<i>p,t</i>}	costo unitario de “backorder” por la atención tardía de producto <i>p</i> requerido por el mercado para el período <i>t</i>
<i>cb</i>_{<i>p,j,t</i>}	costo unitario de “backorder” por la atención tardía de producto <i>p</i> requerido por el destino <i>j</i> para el período <i>t</i>

$cf_{p,p'}$	costo unitario de reprocesamiento de la interfase $p - p'$
$cid_{p,j}$	costo unitario de mantenimiento de stock de producto p en el depósito j durante todo el horizonte
$cid_{p,t}$	costo unitario de mantenimiento de stock de producto p en el depósito por unidad de tiempo del período t
$cif_{p,p'}$	costo total de reprocesamiento de la interfase $p - p'$
$cin_{p,p'}$	costo unitario de impulsión de producto p en el nodo de ingreso s
cir_p	costo unitario de mantenimiento de stock de producto p en tanques de la refinería
$cp_{p,j}$	costo unitario de bombeo del producto p hasta el depósito j
dd_t	finalización del período de tiempo t
$dem_{p,j,t}$	demanda de producto p en el depósito j para el período t
$DL_{p,j}$	requerimiento mínimo de producto p en la terminal receptora j
D_{\min}/D_{\max}	tamaños mínimo y máximo para entregas desde el poliducto
$DU_{p,j}$	volumen máximo de p que puede derivarse hacia la terminal j
e_t/s_t	finalización/inicio del período de detención programada ℓ
F_i^o	coordenada superior del “batch” en tránsito i al iniciar el programa
H	estimación del tiempo al cual podría liberarse el último “batch” introducido en el sistema
hf	número de períodos en la valla de tiempo estricta
h_{\max}	duración real del horizonte de planeación
h_t	extensión del período t
hw_{\max}	tiempo máximo de operación en horario normal
$(IA_{\max})_p$	inventario máximo de producto p permitido en los depósitos
$(IA_{\min})_p$	inventario mínimo de producto p permitido en los depósitos
$(ID_{\max})_{p,j}$	inventario máximo admisible de producto p listo para despacho en el depósito j

$(ID_{\min})_{p,j}$	inventario mínimo admisible de producto p listo para despacho en el depósito j
$IF_{p',p}$	volumen de la interfase entre productos p y p'
IR^o_p	stock inicial de combustible p en tanques de la refinería
$(IR_{\max})_p$	inventario máximo admisible de producto p en la refinería
$(IR_{\min})_p$	inventario mínimo admisible de producto p en la refinería
$l_{\min,p}, l_{\max,p}$	extensión mínima/máxima para inyecciones de producto p
N	número de periodos que componen el horizonte rodante
$NS/CS_{p,j,t}$	órdenes nuevas/canceladas de p en el destino j para el período t
PH_{\max}	horas pico acumuladas a lo largo del horizonte
PV	contenido volumétrico total del sistema de tuberías
Q_i^o/W_i^o	contenido inicial del lote en tránsito i
Q_{\min}/Q_{\max}	tamaño mínimo/máximo de una inyección
$Q_{\min,p}/Q_{\max,p}$	tamaño mínimo/máximo de una inyección de producto p
q_r	volumen producido en la campaña de refino r
sf	número de periodos en la valla de tiempo flexible
$SL_{p,s}$	cantidad mínima de producto p a impulsar desde el nodo s
st_p	tiempo de retención y asentamiento para lotes de producto p
$SU_{p,s}$	cantidad máxima de producto p que puede proveerse desde s
vb	caudal de bombeo constante
$vb_{\min/\max}$	caudal de bombeo mínimo/máximo
$vb_{\min/\max,s}$	caudal de inyección mínimo/máximo en la terminal de ingreso s
vb_p	caudal de impulsión de producto p
$vm_{p,j}$	caudal máximo de descarga de p desde el depósito j al mercado
vp_r	caudal de producción de la campaña r
$\eta_{p,s,j}$	coeficiente de ponderación de la demanda de p atendida desde la fuente s al destino j
φ_s	tiempo de transición entre dos inyecciones sucesivas ejecutadas en nodo de ingreso s

ρ	costo unitario de penalidad por la no-utilización de la línea
σ	coordenada volumétrica del único destino
σ_j	coordenada volumétrica del destino j
$\tau_{p',p}$	tiempo de transición en la inyección sucesiva de productos p y p'
τ_s	coordenada volumétrica de localización de la fuente de ingreso s
ψ	costo unitario de penalidad por la utilización de la línea en horas pico de demanda eléctrica

Variables Continuas

AT_i	tiempo al que se completa el arribo del lote i al depósito
BC	costo total de penalidad por incumplimientos en la atención de las demandas
$B_{p,j,t}$	orden de retraso o “backorder” de producto p , requerida para el período t , a ser satisfecha en el período $(t+1)$ en el destino j
$B_{p,t}$	orden de retraso o “backorder” de producto p , requerida para el período t , a ser satisfecha en el período $(t+1)$
C_i/L_i	tiempo de finalización/duración de la inyección del nuevo lote i
C_k/L_k	finalización/duración de la corrida/bloque de inyecciones k
$D_i^{(i)}$	volumen del lote i derivado al depósito durante el bombeo de i'
$D_{i,j}^{(i)}$	volumen del lote i derivado al depósito j durante el bombeo de i'
$D_{i,j}^{(k)}$	derivación del lote i al depósito j durante la ejecución/bloque k
$DM_{p,j}^{(i)}$	cantidad de producto p enviada desde j al mercado, durante el intervalo $[C_{i-1}, C_i]$
$DP_{i,j,p}^{(i)}$	cantidad de producto p derivada desde el “batch” i al destino j durante la inyección del “batch” i'
$DP_{i,j,p}^{(k)}$	cantidad de producto p derivada desde el “batch” i al destino j durante la ejecución/bloque k
$F_i^{(i)}$	coordenada superior del lote i a tiempo C_i
$F_{i+1}^{(i)}$	coordenada inferior del lote i a tiempo C_i
$F_{i,k}$	coordenada superior del lote i a tiempo C_k

$G_i^{(i')}$	tiempo requerido para expulsar al lote i fuera de la línea, durante la inyección del nuevo lote i'
$IA_{p,t}$	inventario total de producto p en el depósito durante el período t , incluyendo los lotes retenidos, en período de asentamiento
$ID_{p,j}^{(i')}$	inventario de producto p en el depósito j a tiempo $C_{i'}$
$ID_{p,t}$	inventario de producto p en el depósito, listo para atender demandas durante el período t
$IRF_p^{(i')}$	inventario de producto p en la refinería a tiempo $C_{i'}$
$IRS_p^{(i')}$	inventario de producto p en la refinería a tiempo $(C_{i'} - L_{i'})$
$L_{k,s}$	duración de la inyección k ejecutada en la fuente s
$LP_{i,p}$	extensión de la inyección del “batch” i conteniendo producto p
PC_k	costo total de inyección y bombeo durante la ejecución/bloque k
PH	utilización del sistema en horas pico
Q_i	tamaño inicial del nuevo lote inyectado i
$Q_{i,s}^{(k)}$	tamaño del “batch” i impulsado desde la fuente s durante la ejecución/bloque k
$QA_{i,p,t}$	volumen de producto p en el lote i , descargado completamente desde el poliducto en el transcurso del período t
$QP_{i,p}$	volumen de producto p inyectado en el “batch” i
$QP_{i,s,p}^{(k)}$	volumen de producto p inyectado en el “batch” i desde la terminal de ingreso s durante la ejecución/bloque k
$QR_{i,p,t}$	volumen de producto p en el lote i , liberado en el depósito durante el período t
RT_i	tiempo al que se libera el lote i en el depósito
$SL_{i,r}$	volumen de la campaña r disponible en tanques de la refinería a tiempo C_i
$SU_{i,r}$	volumen de la campaña r disponible en tanques de la refinería a tiempo $(C_i - L_i)$
TC_i	costo total de reprocesamiento de la interfase entre i e $(i+1)$
UC	costo total de penalidad por la no-utilización del sistema
$WIF_{i,p',p}$	volumen de interfase entre los lotes i e $(i-1)$ con productos p y p'
$W_i^{(i')}$	contenido del “batch” i a tiempo $C_{i'}$

$W_{i,k}$ contenido del “batch” i a tiempo C_k

Variables Binarias

$r_{i,t}$ denota que el “batch” i arriba al depósito en el transcurso del período t

$rs_{i,t}$ denota que el “batch” i se libera en el transcurso del período t

$v_{i,\$}$ denota que el tamaño $\$$ se selecciona para dimensionar al “batch” i

$w_{i,l}$ denota que la inyección del “batch” i comienza después de la culminación de la detención programada l

$w_{i,t}$ denota que la inyección del “batch” i finaliza en el período t

$w_{i,s}^{(k)}$ denota que una parte del “batch” i se inyecta en la fuente s a través de la ejecución/bloque de inyecciones k

$x_{i,i'}$ denota que una fracción del “batch” i se transfiere a tanques del depósito durante la inyección del lote i'

$x_{i,j}^{(i')}$ denota que una fracción del “batch” i se transfiere a tanques del depósito j durante la inyección del lote i'

$x_{i,j}^{(k)}$ denota que una fracción del “batch” i se transfiere a tanques del depósito j durante la ejecución/bloque de inyecciones k

$y_{i,p}$ denota que el “batch” i contiene producto p

$zl_{i,r}$ denota que la inyección del “batch” i finaliza luego del inicio de la campaña de refino r

$zl_{i,r}$ denota que la inyección del “batch” i comienza luego de la finalización de la campaña de refino r

Bibliografía

- (1) Association of Oil Pipe Lines. American Petroleum Institute (2009) *In the Pipe*. AOPL: Washington, EE.UU. www.aopl.org
- (2) Ballou, R.H. (2004) *Logística: Administración de la Cadena de Suministro*. Pearson Educación, México.
- (3) Boschetto, S.N., Felizari, L.C., Yamamoto, L., Magatão, L., Stebel, S.L., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Lüders, R., Ribas, P.C., Bernardo, L.F.J. (2008) An Integrated Framework for Operational Scheduling of a Real-World Pipeline Network. *Computer Aided Chemical Engineering*, 25, 259-264.
- (4) Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. (2006) *GAMS - A user's guide*. GAMS Development Corporation: Washington, EE.UU.
- (5) Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2004) Optimal Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems Using a Non-Discrete MILP Formulation. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 2053-2068.
- (6) Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2008a) Efficient Tool for the Scheduling of Multiproduct Pipelines and Terminal Operations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 9941-9956.
- (7) Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2008b) Dynamic Scheduling of Multiproduct Pipelines with Multiple Delivery Due Dates. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 728-753.
- (8) Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2009). Optimal Scheduling of Refined Products Pipelines with Multiple Sources. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, 6675-6689.

- (9) Camacho E.F., Ridao M.A., Ternero J.A., Rodriguez J.M. (1991) Optimal Operation of Pipeline Transportation Systems. *IFAC Symposia Series - Proceedings of a Triennial World Congress*, 5, 455-460.
- (10) Cheng L., Duran M.A. (2004) Logistics for World-Wide Crude Oil Transportation Using Discrete Event Simulation and Optimal Control. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 897-911.
- (11) Crane D.S., Wainwright R.L., Schoenefeld D.A. (1999) Scheduling of Multi-Product Fungible Liquid Pipelines Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*, 280-285.
- (12) García-Sánchez, A., Arreche, L.M., Ortega-Mier, M. (2008) Combining Simulation and Tabu Search for Oil-Derivatives Pipeline Scheduling. *Studies in Computational Intelligence*, 128, 301-325.
- (13) Hane, C.A., Ratliff, H.D. (1995) Sequencing Inputs to Multi-Commodity Pipelines. *Annals of Operations Research*, 57, 73-101.
- (14) Hull, B. (2005) Oil Pipeline Markets and Operations. *Journal of the Transportation Research Forum*, 44, 111-125.
- (15) ILOG OPL Studio 3.7 User's Manual (2004) ILOG S.A.: Francia.
- (16) Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (2000) *El ABC del Petróleo y del Gas en el Mundo y en la Argentina*. IAPG: Buenos Aires, Argentina.
- (17) Jittamai, P. (2004) *Analysis of Oil-Pipeline Distribution of Multiple Products Subject to Delivery Time-Windows*. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Texas A&M, College Station: Texas, EE.UU.
- (18) Magatão, L., Arruda, L.V.R., Neves-Jr, F. (2004) A Mixed Integer Programming Approach for Scheduling Commodities in a Pipeline. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 171-185.

- (19) Milidiu R.L., Pessoa A.A., Laber E.S. (2003) The Complexity of Makespan Minimization for Pipeline Transportation. *Theoretical Computer Science*, 306, 339-351.
- (20) Mori, F.M., Luders, R., Arruda, L. V. R., Yamamoto L., Bonacin M.V., Polli H.L., Aires M.C., Bernardo, L.F.J. (2007) Simulating the Operational Scheduling of a Realworld Pipeline Network. *Computer Aided Chemical Engineering*, 24, 691-696.
- (21) Moura, A.V., de Souza, C.C., Cire, A.A., Lopez, T.M. (2008). Planning and Scheduling the Operation of a Very Large Oil Pipeline Network. *Lecture Notes in Computer Science*, 5202, 36-51.
- (22) Neves-Jr, F., Magatão, L., Stebel, S.L., Boschetto, S.N., Felizari, L.C., Czaikowski, D.I., Rocha, R., Ribas, P.C. (2007) An Efficient Approach to the Operational Scheduling of a Real-World Pipeline Network. *Computer Aided Chemical Engineering*, 24, 697-702.
- (23) Nguyen H.H., Chan C.W. (2006) Applications of Artificial Intelligence for Optimization of Compressor Scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19, 113-126.
- (24) Pipeline Simulation Interest Group (2000) *Common Language Standard PSIG 001/2000*. PSIG: EE.UU.
- (25) Rabinow, R.A. (2004) *The Liquid Pipeline Industry in the United States, Where It's Been, Where It's Going*. Association of Oil Pipelines.
- (26) Reddy, P.C.P., Karimi, I.A., Srinivasan, R. (2004) A New Continuous-Time Formulation for Scheduling Crude Oil Operations. *Chemical Engineering Science*, 59, 1325-1341.
- (27) Rejowski-Jr, R., Pinto, J.M. (2003). Scheduling of a Multiproduct Pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 1229-1246.

- (28) Rejowski-Jr, R., Pinto, J.M. (2004). Efficient MILP Formulations and Valid Cuts for Multiproduct Pipeline Scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 1511-1528.
- (29) Rejowski-Jr, R.; Pinto, J.M. (2008) A Novel Continuous Time Representation for the Scheduling of Pipeline Systems with Pumping Yield Rate Constraints. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 1042-1066.
- (30) Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa A.P.F.D., Fialho J., Pinheiro A. S. (2006) Pipeline Scheduling and Inventory Management of a Multiproduct Distribution Oil System. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 7841-7855.
- (31) Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa A.P.F.D., Fialho J. (2007) Reactive Scheduling Framework for a Multiproduct Pipeline with Inventory Management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46, 5659-5672.
- (32) Sasikumar, M., Prakash, P.R., Patil S.M., Ramani, S. (1997) PIPES: A Heuristic Search Model for Pipeline Schedule Generation. *Knowledge-Based Systems*, 10, 169-175.
- (33) Secretaría de Energía de la Nación Argentina. (2009) *Información Estadística del Mercado de Hidrocarburos. Transporte por Ductos*. www.energia.gov.ar
- (34) Shah, N. (1996) Mathematical Programming Techniques for Crude Oil Scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 20, 1227-1232.
- (35) Sheppard, N. (1984). *Introduction to the Oil Pipeline Industry*. Universidad de Texas, Austin: Texas, EE.UU.
- (36) Trench, C.J. (2001) *How Pipelines Make the Oil Market Work – Their Networks, Operation, and Regulation*. Allegro Energy Group, Association of Oil Pipelines, Nueva York, EE.UU., 1-20.

- (37) Van den Heever, S.A., Grossmann, I.E. (2003) A Strategy for the Integration of Production Planning and Reactive Scheduling in the Optimization of a Hydrogen Supply Network. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 1813-1839
- (38) Zyngier, D., Kelly, J.D. (2006) Multi-Product Inventory Logistics Modeling in the Process Industries. *Workshop de DIMACS y ExxonMobil sobre Optimización Computacional y Desafíos de la Logística Empresarial (COLCE)*. Editado por Furman, K.C., Grossmann, I.E., Springer, EE.UU.