



Tesis Doctoral

PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES LOGÍSTICAS EN LA CADENA DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES

*Doctorado en Ingeniería Mención Industrial
Universidad Tecnológica Nacional (UTN- FRSF)*

Doctorando: Vanina G. Cafaro

Director: Dr. Jaime Cerdá

Co-Director: Dr. Carlos A. Méndez

- Marzo de 2014-

Cafaro, Vanina Guadalupe

Programación de operaciones logísticas en la cadena de suministro de combustibles. - 1a ed. -
Santa Fe : el autor, 2015.
257 p. ; 29x21 cm.

ISBN 978-987-33-6573-7

1. Combustibles. 2. Tesis Doctoral. I. Título
CDD 621.182

A mis padres
A Pato y Faustina

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi director de tesis el Dr. Jaime Cerdá, por su dedicación permanente y sus enriquecedores aportes a lo largo de mi formación doctoral. Por ser un ejemplo de persona a seguir, por su exigencia personal y para con los demás, por enseñarme el camino para alcanzar la meta y por el tiempo dedicado a leer y corregir minuciosamente la presente tesis.

A mi co-director el Dr. Carlos A. Méndez, por sus valiosos aportes y consejos a lo largo de estos años, por su forma tan amena de promover el trabajo en equipo y su capacidad para relacionarse y difundir los aportes del grupo CAPSE.

A mi colega y hermano el Dr. Diego C. Cafaro, por el tiempo dedicado, por su enorme capacidad de generar y transmitir nuevas ideas, por su simpleza e inteligencia para evaluar estrategias de solución frente a cada problema planteado, y por ser otro de mis guías durante mi formación profesional.

A mis padres, Susana y Juan Carlos, por ser mis ejemplos de vida, por educarme y saber transmitir sus valores, por darme la posibilidad de formarme profesionalmente, por su apoyo incondicional y por enseñarme que con mucho esfuerzo y dedicación todo se logra.

A mi esposo Patricio y a mi pequeña Faustina, por su gran comprensión, por su enorme cariño y paciencia, por su compañía incondicional, por darle sentido a mi vida y por alegrar mis días.

A mi gran familia: hermanos, cuñados, sobrinos, suegros y amigos, por el cariño, por comprenderme y acompañarme en las buenas y en las malas a lo largo de estos años.

A todo el grupo CAPSE por las reuniones y debates tan amenos. Pero muy especialmente a mis colegas y amigos Adrián y Mariana, por ser excelentes compañeros de estudio y brindarme su amistad durante todo el tiempo compartido.

También quiero agradecer muy especialmente a la Universidad Tecnológica Nacional por abrirme sus puertas y a los directivos y docentes del doctorado de dicha casa de estudios, por ofrecer todo lo necesario para mi formación doctoral.

Al Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC) y la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral, por brindarme un lugar de trabajo confortable para la realización de mis labores.

Finalmente, y no por menos, a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por el soporte económico recibido.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS.....	13
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LAS OPERACIONES DE POLIDUCTOS	
I.1. LA IMPORTANCIA DEL TRANSPORTE POR POLIDUCTOS	15
I.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL TRANSPORTE POR POLIDUCTOS.....	17
I.3. COMPONENTES DE UN POLIDUCTO	21
I.4. CONTROL Y OPERACIÓN REMOTA DE POLIDUCTOS.....	22
I.5. FUNCIONAMIENTO DE LOS POLIDUCTOS	25
I.6. TOPOLOGÍA DE POLIDUCTOS	27
I.7. DESCRIPCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE POR POLIDUCTOS	29
I.8. REVISIÓN LITERARIA: ANÁLISIS PRELIMINAR DEL ESTADO DEL ARTE.....	31
I.8.1. Métodos de descomposición	31
I.8.2. Metodologías basadas en la resolución de modelos matemáticos	35
CAPÍTULO II.....	45
NUEVOS DESAFÍOS AFRONTADOS EN ESTA TESIS	
II.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	45

II.1.1. Programación de las operaciones de poliductos	45
II.2. NUEVOS DESAFÍOS A AFRONTAR	48
II.3. CRITERIOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE LA SECUENCIA DE LAS OPERACIONES DE CORTE.....	51
II.3.1. Volúmenes de flujos activados y detenidos, y la ventaja de las operaciones con múltiples entregas a terminales por corrida de bombeo	53
II.3.2. Política de entregas múltiples por operación a nivel de planificación detallada.....	54
II.4 ENFOQUE JERÁRQUICO DE RESOLUCIÓN	55
II.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	58
CAPÍTULO III	61
PROGRAMACIÓN DETALLADA DE LAS OPERACIONES DE INYECCIÓN Y DESCARGA DE PRODUCTOS EN POLIDUCTOS	
III.1. INTRODUCCIÓN	61
III.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	63
III.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	65
III.4. OBJETIVO DE ESTE CAPÍTULO.....	66
III.5. ESTRUCTURA DEL MODELO DE SIMULACIÓN PROPUESTO	67
III.6. COMPONENTES PRINCIPALES DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	69
III.6.1. Estación de Inyección	70
III.6.2. Segmentos del poliducto	72
III.6.3. Terminales de inyección y distribución	73
III.7. REGLAS HEURÍSTICAS PARA SELECCIONAR LA TERMINAL DE DESTINO.....	74
III.7.1. Algoritmo para seleccionar la terminal activa	75
III.7.2. Reglas de priorización de terminales	77

III.8. RESULTADOS	79
III.8.1. Caso de Estudio: Un problema real de la industria petrolera	79
III.8.2. Interfaz del modelo de simulación propuesto	82
III.8.3. Aplicación de reglas heurísticas para elegir la terminal de entrega.....	83
III.9. CONCLUSIONES PRELIMINARES	89
CAPÍTULO IV	91
PROGRAMACIÓN DETALLADA CON ENTREGAS SIMPLES	
IV.1. INTRODUCCIÓN.....	91
IV.2. EJEMPLO MOTIVADOR	93
IV.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	100
IV.4. MODELO MATEMÁTICO PARA LA PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE OPERACIONES DETALLADAS EN POLIDUCTOS CON UNA ÚNICA FUENTE	
IV.4.1 Conjuntos y parámetros del modelo.....	101
IV.4.2 Variables del problema	103
IV.4.3 Restricciones del modelo	103
IV.4.4. Función Objetivo.....	112
IV.5. ESTRATEGIAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DE LA FORMULACIÓN MILP	113
IV.5.1 Descomposición Total (<i>FD</i>).....	115
IV.5.2 Algoritmo de descomposición de a pares (<i>PD</i>)	116
IV.5.3 Algoritmo sin descomposición (<i>ND</i>).....	118
IV.6. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y ESTRATEGIAS DE RESOLUCIÓN A DISTINTAS VARIANTES DE UN CASO DE ESTUDIO.....	
IV.6.1 Ejemplo IV.1	119
IV.6.2 Ejemplo IV.2	125

IV.6.3 Ejemplo IV.3.....	130
IV.6.4 Efecto del número de corridas sobre el costo computacional	135
IV.7. CONCLUSIONES PRELIMINARES	137
CAPÍTULO V	141
PROGRAMACIÓN DETALLADA CON ENTREGAS SIMULTÁNEAS	
V.1. INTRODUCCIÓN	141
V.2. EJEMPLO MOTIVADOR	143
V.3. HIPÓTESIS DEL PROBLEMA.....	148
V.4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	150
V.4.1 Conjuntos y variables del problema.....	151
V.4.2 Restricciones del modelo.....	153
V.4.3 Función Objetivo	167
V.5. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS	167
V.5.1. Ejemplo V.1	169
V.6. CONCLUSIONES PRELIMINARES	190
CAPÍTULO VI	193
PROGRAMACIÓN DETALLADA DE POLIDUCTOS CON MÚLTIPLES FUENTES	
VI.1 INTRODUCCIÓN	193
VI.2. ILUSTRACIÓN DEL REFINAMIENTO DEL PLAN AGREGADO DE UN POLIDUCTO CON MÚLTIPLES FUENTES.....	194
VI.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	196
VI.4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	198
VI.4.1 Principales conjuntos del problema	199
VI.4.2. Variables del modelo.....	203

VI.4.3. Restricciones del problema	204
VI.4.4 Función objetivo	214
VI.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	215
VI.5.1 Ejemplo VI.1: Un caso de estudio real – Red de poliductos argentinos	216
VI.5.2 Ejemplo VI.2	229
VI.6. CONCLUSIONES PRELIMINARES.....	236
CAPÍTULO VII.....	239
CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS FUTUROS	
VII.1. CONCLUSIONES FINALES	239
VII.2. TRABAJOS FUTUROS.....	246
NOMENCLATURA	249
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	253

RESUMEN

Los poliductos sirven para transportar una amplia variedad de combustibles derivados del petróleo a través de largas distancias desde refinерías a múltiples centros de distribución localizados en las cercanías de los principales mercados de consumo. Lotes de diferentes productos o de distintas calidades de un mismo producto se bombean sucesivamente en el poliducto sin usar, generalmente, dispositivos de separación. A causa de la incompresibilidad de los líquidos, la descarga de productos desde el poliducto a las terminales de destino, e incluso el movimiento de los lotes a lo largo del poliducto, ocurren simultáneamente con la inyección de nuevos lotes ó "batches" en las estaciones de ingreso. Los poliductos difieren entre sí por el modo en que son operados. Pueden trabajar en modo segregado o en el llamado modo "fungible" o consolidado. En modo segregado, la identidad del material despachado por el cliente se conserva a lo largo del poliducto y se entrega en el destino estipulado. En modo "fungible", en cambio, el lote inyectado en el origen puede diferir del lote recibido en el punto de destino y puede incluso derivarse a múltiples terminales de distribución. Sin embargo, los lotes recibidos presentan las mismas especificaciones técnicas de los ingresados porque el modo fungible se adopta cuando se transportan productos derivados del petróleo de calidad estandarizada. El modo "fungible" o consolidado tiene la ventaja de minimizar la generación de material de interfase, al reducir el número de lotes a inyectar mediante la consolidación o agregación de lotes del mismo producto con similar calidad, provenientes de distintos clientes y con

diferentes destinos. Además, permite una utilización más eficiente de los tanques en terminales. En esta tesis, se supone que el poliducto opera en modo fungible.

Usualmente el proceso de planeación y programación de poliductos requiere primero conocer el número de períodos del horizonte de programación y la duración de cada período, el conjunto de nominaciones u órdenes a cumplimentar en las distintas terminales del poliducto y sus fechas de entrega, los planes de producción de las refinerías, los inventarios iniciales en los tanques de las estaciones de entrada y el contenido inicial del poliducto. En base a esa información, se realiza el desarrollo de la programación de operaciones del poliducto, a nivel agregado, para concretar las entregas demandadas por las terminales de distribución dentro de los plazos estipulados. Como un dato derivado de petróleo puede ser requerido por múltiples terminales a diferentes fechas de entrega, la elección del tamaño de los lotes a bombear en el ducto es una decisión crucial, difícil de adoptar, que surge de un óptimo "trade-off" entre dos metas: minimizar el número de interfases (mediante lotes de gran tamaño) y evitar atrasos en la entrega de otros productos (a través de lotes más pequeños).

La principal dificultad en la gestión de las operaciones de poliductos radica en el gran número de restricciones que deben considerarse. El proceso de planeación agregada busca determinar, por un lado, los lotes de productos a inyectar desde cada estación de entrada y sus correspondientes tamaños para atender las demandas de los distintos centros de distribución, y por el otro, la secuencia de inyección de los lotes a realizar desde cada nodo fuente. Posteriormente, se debe llevar a cabo una programación detallada de las acciones a realizar por el operador del

poliducto referidas al cierre y apertura de válvulas de acceso a tanques de terminales y el encendido ó apagado de las unidades de impulsión de la red de poliductos para cumplimentar el programa agregado de corridas de bombeo propuesto previamente. En efecto, al establecer la secuencia óptima de inyecciones de "batches" a nivel agregado, las herramientas usadas no especifican con precisión el orden de ejecución de las entregas de lotes a terminales durante cada inyección de un nuevo lote. Estas 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. Es por ello que los operadores de poliductos requieren herramientas más sofisticadas para programar apropiadamente, a nivel de ejecución o "de piso de poliducto", la secuencia de inyecciones de "batches" en el poliducto ("programación de inyecciones" o "Input Schedule") y de las descargas de material desde el poliducto a las terminales de destino ("programación de descargas" o "Output Schedule").

Otra cuestión que complejiza aún más la programación, es el hecho que la entrega de un lote de producto o de una porción del mismo a una terminal de distribución, durante la inyección de un nuevo lote de producto, se deba, a menudo, ejecutar a través de dos o más descargas no-consecutivas para cumplimentar el programa de entregas a depósitos prescripto en el plan agregado. A ello se deben agregar las paradas imprevistas del poliducto por insuficiencia de capacidad de tanques, y el manejo detallado de la granja de tanques en cada terminal del poliducto, que hacen que la programación de las operaciones logísticas del poliducto sea una tarea sumamente compleja.

Otro aspecto importante a considerar en la representación del problema es la estructura del poliducto. Un poliducto simple transporta productos desde una única estación de entrada a múltiples terminales y opera en un solo sentido ("flujo uni-direccional"). Pese a que se trata de una estructura simple, el modo de operar el poliducto puede ser complejo. En este tipo de configuraciones generalmente se presentan dos tipos de políticas para abastecer las terminales: (i) entregas simples, atendiendo una única terminal por vez; (ii) entregas simultáneas, a través de las cuales se deriva material desde el poliducto hacia más de una terminal por vez. Este tipo de entregas simultáneas requiere regular el caudal, modificando la velocidad del flujo en determinados segmentos del poliducto, para permitir entregas "al paso".

Sin embargo, a menudo, un número de tuberías individuales están interconectadas entre sí formando una red. Poliductos en red incluyen más de un punto de inyección (múltiples terminales de ingreso) y más de un punto de descarga (múltiples terminales de recepción o distribución). En una red de poliductos, resulta importante establecer la secuencia de inyecciones de lotes desde cada nodo fuente y su cronograma de ejecución ("programación detallada de inyecciones de lotes por terminal de ingreso"), así como la secuencia y cronograma de entregas por terminal de distribución durante cada corrida de bombeo ("programación detallada de entregas por terminal y por corrida de bombeo").

La programación detallada de los despachos de combustibles hacia los centros de distribución juega un rol preponderante en la optimización del funcionamiento de bombas y otros dispositivos del sistema. La configuración y el caudal de trabajo de las unidades impulsoras, así como el número de detenciones y arranques parciales de cada tramo de tubería,

determinan vectores de costo muy importantes asociados al consumo energético, la vida útil y el mantenimiento de cada componente motriz. La multiplicidad de alternativas operacionales que se manejan a este nivel detallado de planeación torna indispensable el uso de técnicas eficientes para el análisis y resolución de la problemática.

Asumiendo que el plan agregado de inyecciones de lotes y descargas a terminales se encuentra disponible, el principal objetivo de la tesis consiste en generar el programa detallado de entregas de productos a las terminales de distribución estableciendo eficientemente los productos y cantidades a despachar, el orden en que se realizarán las descargas y el tiempo de iniciación y finalización de cada entrega.

A lo largo de los capítulos de la tesis se propone el desarrollo de diversas metodologías de tipo heurístico y riguroso para obtener el programa detallado de operaciones de entregas. Primeramente, se presenta un método heurístico basado en un modelo de simulación de eventos discretos para la programación detallada de las operaciones en poliductos con una única fuente de inyección y múltiples terminales de entrega. El enfoque propuesto sirve para validar el plan agregado definido con anterioridad y a su vez para generar el programa detallado a implementar para dar cumplimiento a dicho plan. Por su parte, el modelo de simulación permite testear diferentes programas de operaciones en reducidos tiempos computacionales. Asimismo, el simulador genera una interfaz gráfica animada que permite observar la evolución dinámica del contenido y funcionamiento del poliducto.

A posteriori, se plantea un método riguroso alternativo para resolver el problema de programación detallada de poliductos con una única fuente abordado previamente con el modelo de simulación. El método está basado

en una formulación matemática lineal mixta entera (MILP) de dominio de tiempo continuo. El objetivo consiste en minimizar los costos de operación del poliducto principalmente relacionados con el consumo de energía debido al bombeo de los líquidos. La formulación matemática propuesta, resuelta con estrategias de solución alternativas, logra encontrar la mejor programación de las operaciones de poliductos a bajos tiempos de CPU, admitiendo una sola descarga de producto a una única terminal de destino en cada operación.

En un capítulo posterior, se logra resolver el problema de programación detallada de las operaciones de un poliducto simple (una terminal de inyección y múltiples destinos) pero en esta instancia, se considera la posibilidad de realizar descargas de productos a más de una terminal de destino durante una misma operación de corte. Se propone un modelo lineal mixto entero de tipo continuo que tiene la habilidad de manejar caudales diferentes en los diversos segmentos activos del poliducto, a través de la realización de entregas parciales "al paso" a terminales intermedias. Este novedoso enfoque logra representar el tipo de política comúnmente empleada por los operadores de poliductos, que permite el abastecimiento simultáneo a múltiples terminales de destino. Al incorporar esta posibilidad, el modelo propuesto logra reducir el consumo de energía y los costos asociados al sistema de bombeo debido a que se minimiza el volumen de segmentos de poliductos donde el flujo de líquido debe ser posteriormente puesto en movimiento. El costo de bombeo está principalmente determinado por la reactivación del flujo de líquidos en segmentos inactivos.

Adicionalmente, una parte de la tesis está dedicada a resolver eficientemente el problema de programación de las operaciones en

configuraciones más complejas de poliductos. Más precisamente, en poliductos con múltiples fuentes de inyección y múltiples terminales de destino. A ese fin, se propone una formulación rigurosa de tipo continua que logra proporcionar el programa detallado de las operaciones de inyección en las distintas fuentes del poliducto, y de entrega de productos a terminales de distribución. El modelo es resuelto a muy bajo costo computacional, pese a tratarse de una configuración más compleja. Como anteriormente, el objetivo es minimizar los costos operativos.

La potencialidad de cada metodología planteada se evalúa a través de la resolución de diversos casos de estudio reales de la industria petrolera que sirven de base tanto para evaluar la eficiencia computacional de las formulaciones propuestas y la calidad de las soluciones halladas, como para realizar un análisis comparativo con contribuciones previas.

Lista de Figuras

Figura I.1. Disposición de productos dentro de un poliducto.....	18
Figura I.2. Sistema de distribución por ductos del país.....	19
Figura I.3 Representación de las operaciones de inyección y entrega de lotes en el tiempo	20
Figura I.4. Componentes básicos de un poliducto	22
Figura I.5. Control y operación de un poliducto mediante un sistema SCADA.	24
Figura I.6. Modos de operación de los poliductos	26
Figura II.1. Representación de las soluciones halladas con diferente nivel de detalle	50
Figura II.2. Segmentos activos y detenidos mientras se inyecta un nuevo lote	51
Figura II.3. Estrategia de solución jerárquica propuesta para el problema de programación de poliductos	57
Figura III.1. Terminal activa y segmentos activos y estáticos	68
Figura III.2. Componentes principales del modelo de simulación.....	69
Figura III.3. Información resultante del proceso la planeación agregada: Matriz de entregas agregadas lote/terminal.....	74
Figura III.4. Red de poliductos de REPLAN	80
Figura III.5. Plan agregado propuesto para el caso de estudio (Cafaro y Cerdá, 2008).....	82
Figura III.6. Vista de la interfaz animada	83
Figura III.7. Programación de entregas detalladas utilizando las reglas heurísticas: (a) NF, (b) FF, y (c) NC para la primera semana de operación	84
Figura III.8. Programación de entregas detalladas utilizando la regla heurísticas NC para la primera semana del horizonte de planeación	87

Figura III.9. Programa de entregas usando las reglas heurísticas (a) NF, (b) FF, y (c) NC para un horizonte mensual.....	89
Figura IV.1. Programa agregado para el ejemplo de aplicación	94
Figura IV.2. Programa detallado priorizando la entrega al depósito más cercano al origen	95
Figura IV.3. Programa detallado óptimo para el ejemplo motivador	98
Figura IV.4. Relación entre las coordenadas superiores de lotes adyacentes al final de la corrida k.	106
Figura IV.5. Procedimiento Iterativo del algoritmo PD.....	117
Figura IV.6. Operaciones de entregas detalladas a realizarse mientras se inyecta el lote B7.....	123
Figura IV.7. Solución óptima para el Ejemplo IV.2 usando la formulación MILP completa	126
Figura IV.8. Programa detallado para el Ejemplo IV.2 usando el modelo de simulación y la regla heurística NC	129
Figura IV.9. Perfil de distribución de los volúmenes reactivados en el Ejemplo IV.2	130
Figura IV.10. Solución óptima para el Ejemplo IV.3 resolviendo la formulación MILP completa	132
Figura IV.11. "Schedule" detallado óptimo para la inyección del "batch" B11 (Ejemplo IV.3)	133
Figura IV.12. "Schedule" detallado para la inyección del lote B11 aplicando el modelo de simulación y la regla NC (Ejemplo IV.3)	133
Figura IV.13. Perfil de distribución de los volúmenes reactivados en el Ejemplo IV.3	134
Figura V.1. Programa agregado para el ejemplo motivador.....	144
Figura V.2. Programa detallado para el ejemplo motivador permitiendo solo entregas simples	144

Figura V.3. Programación detallada para el ejemplo motivador, permitiendo entregas simultáneas	146
Figura V.4. Depósitos y segmentos de un poliducto con una única fuente.....	151
Figura V.5. Ilustración de condiciones no–factibles para entregas simultáneas ...	160
Figura V.6. Ilustración de condiciones factibles para realizar una operación de corte múltiple	161
Figura V.7. Programación Detallada para el Ejemplo V.1 reportada por Rejowski & Pinto (2004).	172
Figura V.8. Programación Agregada para el Ejemplo V.1 aplicando el enfoque de Cafaro & Cerdá (2004).....	174
Figura V.9. "Schedule" detallado óptimo para el Ejemplo V.1	175
Figura V.10. Plan Agregado para el Ejemplo V.2 reportado por Cafaro & Cerdá (2008).	179
Figura V.11. "Schedule" Óptimo considerando entregas múltiples para el Ejemplo 2A.....	185
Figura V.12. Volumen activado acumulado para el Ejemplo V.2, usando diferentes políticas de entregas	186
Figura V.13. Variación del caudal con el tiempo en cada segmento de la tubería para el Ejemplo V.2A	187
Figura V.14. "Schedule" Detallado óptimo para el Ejemplo V.2B bajo restricciones en el caudal	189
Figura V.15. Variación del caudal con el tiempo en cada segmento de la tubería (Ejemplo V.2B).....	190
Figura VI.1A. Configuración del poliducto y plan agregado a refinar	195
Figura VI.1B. Serie detallada de operaciones resultantes del proceso de desagregación.....	195
Figura VI.2. Ilustración de la nomenclatura a utilizar.....	200
Figura VI.3. Planificación agregada incluyendo corridas de inyección combinadas	202

Figura VI.4. Cálculo del caudal en cada segmento del poliducto	213
Figura VI.5. Red de Poliductos Argentinos considerada en el Ejemplo VI.1	217
Figura VI.6. Planeación Agregada para el Ejemplo VI.1 reportado por Cafaro y Cerdá (2010)	218
Figura VI.7. Mejor solución del problema de "scheduling" detallado para el Ejemplo VI.1	223
Figura VI.8. Seguimiento del caudal en cada segmento del poliducto durante el horizonte de planeación (Ejemplo VI.1)	228
Figura VI.9. Planeación agregada para el Ejemplo VI.2	230
Figura VI.10. Programación detallada de entregas para el Ejemplo VI.2 (rango de caudal permitido: 400 – 800 m ³ /h).....	232
Figura VI.11. Seguimiento del caudal en cada segmento del poliducto durante el horizonte de planeación (Ejemplo VI.2)	234

Lista de Tablas

Tabla III.1. Definición de tramos y capacidades.....	80
Tabla III.2. Plan agregado de entradas ("Input Schedule") para el caso de estudio .	81
Tabla III.3. Resultados para los ejemplos resueltos aplicando las diferentes reglas heurísticas en el modelo de simulación.....	87
Tabla IV.1. Entregas agregadas mientras se inyecta el lote B7 (en 10^2 m^3).....	120
Tabla IV.2. Resultados computacionales para los Ejemplos IV.1, IV.2 y IV.3	124
Tabla IV.3. Programa de inyecciones agregadas para el Ejemplo IV.2	125
Tabla IV.4. Resultados computacionales para los Ejemplos IV.2 y IV.3 usando el modelo MILP completo al variar la cardinalidad del conjunto K.....	135
Tabla V.1. Capacidad volumétrica de los segmentos	168
Tabla V.2. Capacidad volumétrica, condiciones iniciales y demanda de cada depósito.....	170
Tabla V.3. Resultados del Ejemplo 1 reportados por Rejowski & Pinto (2004)	173
Tabla V.4. Plan Agregado de Entradas para el Ejemplo V.1, utilizado el enfoque de Cafaro & Cerdá (2004).....	174
Tabla V.5. "Schedule" detallado obtenido para el Ejemplo V.1 aplicando el enfoque propuesto	178
Tabla V.6. "Schedule" Agregado reportado por Cafaro & Cerdá (2008) para el Ejemplo V.2.....	179
Tabla V.7. Comparación de resultados del Ejemplo V.2, utilizando diferentes políticas de entrega y rangos de variación de caudal.....	183
Tabla V.8. Rango admisible de caudal para cada segmento (Ejemplo V.2B).....	188
Tabla VI.1. Tamaño de las inyecciones, terminales de recepción y segmentos activos durante cada corrida agregada para el Ejemplo VI.1	221

Tabla VI.2. Terminal de inyección y entregas agregadas durante cada corrida de bombeo del Ejemplo VI.1	222
Tabla VI.3. Tamaños de los modelos, requerimientos computacionales y resultados para los Ejemplos VI.1 y VI.2.....	224
Tabla VI.4. Variación del caudal en cada segmento del poliducto para el Ejemplo VI.1	227
Tabla VI.5. Inventarios iniciales disponibles en las terminales de entrada en el Ejemplo VI.2 (en 10^2 m^3).....	230
Tabla VI.6. Demanda de Productos de las terminales receptoras para el Ejemplo VI.2 (en 10^2 m^3).....	231
Tabla VI.7. Variación del caudal en cada segmento del poliducto para el Ejemplo VI.2	235

Capítulo I

INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE LAS OPERACIONES DE POLIDUCTOS

I.1. LA IMPORTANCIA DEL TRANSPORTE POR POLIDUCTOS

El transporte de los productos de los sitios de producción a los centros de consumo representa el elemento individual más importante de los costos logísticos de la mayoría de las empresas dedicadas a la producción y distribución de bienes de consumo de alta demanda. El concepto de logística involucra todas aquellas actividades orientadas a la planificación, implementación y control del flujo y almacenamiento de materias primas, productos en proceso y productos finales, comprendiendo desde el punto de origen hasta el punto de destino. El núcleo de las actividades logísticas se vincula a un triángulo en el que se interrelacionan el transporte, el inventario y la localización geográfica de plantas de producción, centros de distribución y clientes, los cuales en conjunto conforman el sistema logístico de una empresa. Su principal objetivo es lograr que ese conjunto de actividades se desarrolle de manera coordinada con el fin de que los

productos de la empresa estén disponibles para los clientes en el momento, lugar y condiciones pactadas, de la manera más beneficiosa desde el punto de vista de costos. Con el transcurso del tiempo, y debido a la conjunción de muchos factores, las actividades logísticas se han tornado cada vez más importantes, especialmente en empresas dedicadas a la producción y comercialización de bienes de alta demanda con una amplia red de distribución, como el petróleo crudo o los derivados de petróleo. Esto se ve reflejado en el hecho de que, para gran parte de las industrias, la logística absorbe más del 30 % de los ingresos del total de las ventas, siendo el transporte el elemento individual más importante en los costos de logística para la mayoría de las empresas. Más aún, se ha observado que el movimiento de carga absorbe entre uno y dos tercios de los costos logísticos totales, lo cual representa entre el 9% y 10% del Producto Bruto Interno (PBI) en la mayor parte de las economías mundiales.

Entre los diversos modos de transporte existentes, tales como los trenes, camiones y barcos, el transporte por poliductos resulta el medio más económico, eficiente, confiable y seguro para el movimiento de grandes volúmenes de fluidos (líquidos o gaseosos) entre sitios muy distantes. Por ese motivo es el medio más utilizado para transportar diferentes tipos de crudos y derivados del petróleo desde las terminales portuarias a refinerías, o desde éstas hacia los centros de distribución localizados en las cercanías de los principales mercados de consumo. Comúnmente, las tuberías denominadas oleoductos se utilizan para movilizar distintas variedades de petróleo crudo, los gasoductos para gas natural y los poliductos (o tuberías multi-producto) para combustibles derivados del petróleo, así como para combustibles alternativos tales como bioetanol y biodiesel. En Estados Unidos, cerca del 65% de los combustibles se transporta por ductos,

representando más del 17% del total de las cargas movilizadas en dicho país, aunque con una incidencia menor al 2% en los costos totales de transporte.

I.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL TRANSPORTE POR POLIDUCTOS

Los poliductos son tuberías simples de sección circular, con un diámetro de hasta 50 pulgadas (1270 mm), donde sustancias de características dispares se introducen en la línea en forma sucesiva, una a continuación de otra. Cada uno de estos productos impulsa al subsiguiente, desde el origen o cabecera hacia los destinos o terminales del sistema de distribución (ver Figura I.1).

El medio de impulsión a utilizar dependerá del estado de agregación de las sustancias transportadas. En la práctica, se emplean compresores rotativos para movilizar sustancias gaseosas, como el gas natural, y bombas centrífugas para impulsar productos líquidos, como los combustibles derivados de petróleo.

En el caso que los productos se encuentren en estado líquido, los sistemas de ductos son capaces de transportar múltiples compuestos debido a la posibilidad de minimizar el mezclado en la superficie de contacto entre dos productos disímiles. Esta situación no ocurre cuando las sustancias se encuentran en estado gaseoso, donde el grado de contaminación es más alto dada la libertad de movimiento de las moléculas. A su vez, el proceso de recuperación de los productos puros se torna mucho más complejo. Es por ello que gasoductos transportan un único tipo de producto.

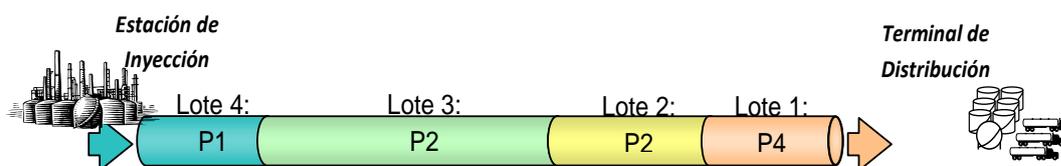


Figura 1.1. Disposición de productos dentro de un poliducto

En países extensos como Argentina, la red de transporte de productos refinados está compuesta por un conjunto de tuberías troncales de diámetro considerable, interconectadas entre sí para movilizar grandes volúmenes de combustibles líquidos a través de grandes distancias. Una tubería troncal normalmente presenta una estación de bombeo en el origen y varias terminales de distribución a lo largo de su recorrido. Los diferentes productos refinados, provenientes de las refinerías aledañas, se inyectan consecutivamente dentro de la línea conformando lotes que se desplazan, uno detrás del otro, normalmente sin dispositivos que los separen. A medida que el líquido contenido dentro de la tubería avanza a lo largo del trayecto, va perdiendo presión, principalmente debido al rozamiento provocado por la fricción con las paredes del ducto. Para lograr que el fluido mantenga una presión lo suficientemente alta, se utilizan bombas centrífugas que aumentan su presión y mantienen el flujo de líquido a través del poliducto.

Los tres principales oleoductos del país parten desde Puerto Hernández, en la cuenca neuquina. Dos de ellos son nacionales, transportando crudo hacia el norte, a la refinería ubicada en Luján de Cuyo (Prov. de Mendoza), y hacia el este hasta Puerto Rosales en la Costa Atlántica. El tercero une Argentina y Chile, atravesando los Andes. En la Figura 1.2 se muestra la red

de ductos que existen en Argentina. Como se puede observar se compone de oleoductos, poliductos y gasoductos troncales.

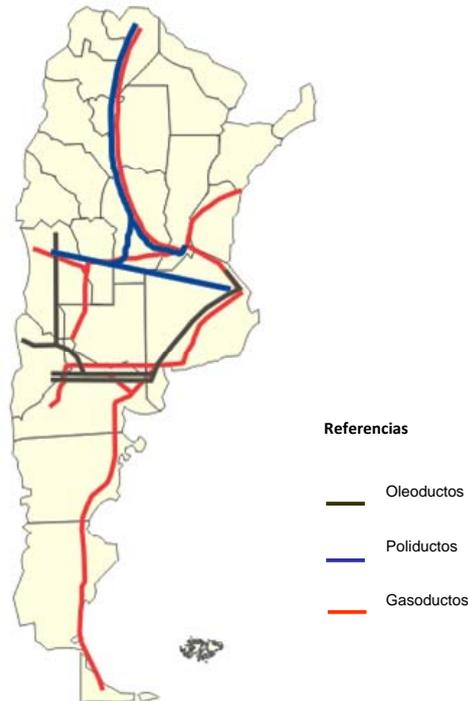


Figura I.2. Sistema de distribución por ductos del país

Por la incompresibilidad de los líquidos, la descarga de productos desde el poliducto a las terminales de destino, así como el movimiento de los lotes a lo largo del poliducto, se producen con la inyección de nuevos "batches" en las estaciones de ingreso. Es decir, las operaciones de inyección y de entrega ocurren simultáneamente. En una red de poliductos de dimensiones importantes existen múltiples estaciones de ingreso y terminales de recepción, por lo que las operaciones de bombeo y extracción de productos pueden tener lugar simultáneamente en distintos puntos de la red.

En la Figura I.3 se describe un poliducto con una fuente de inyección y tres terminales de destino (D1, D2, D3). La primera línea de la figura representa el estado inicial del poliducto, es decir los lotes de productos

contenidos antes de la inyección. Inicialmente, se observan 100 unidades de cada lote: B1(P2), B2(P1), B3(P3), B4(P1), indicándose entre paréntesis el tipo de producto contenido. Por su parte las flechas horizontales ubicadas en el origen del poliducto indican la cantidad y tipo de producto inyectado en cada intervalo de tiempo. Durante la primera hora de operación se inyectan 50 unidades del lote B5 conteniendo producto P2; desde la hora 1.00 hasta las 2.00 h se insertan otras 50 unidades del mismo lote. Las flechas verticales refieren a la cantidad derivada a los depósitos mientras se ejecutan las operaciones de inyección. Por ejemplo la primera inyección que inserta el lote B5 con 50 unidades de producto P2, provoca la derivación de una cantidad idéntica de producto P2 proveniente del lote en tránsito B1 a la terminal de distribución D3. Este tipo de gráficos es comúnmente utilizado para representar la evolución del contenido del poliducto en el tiempo y permite realizar un seguimiento de los lotes en tránsito, la cantidad inyectada, las derivaciones que ocurren simultáneamente y el estado de cada segmento del poliducto al final de cada operación de inyección.

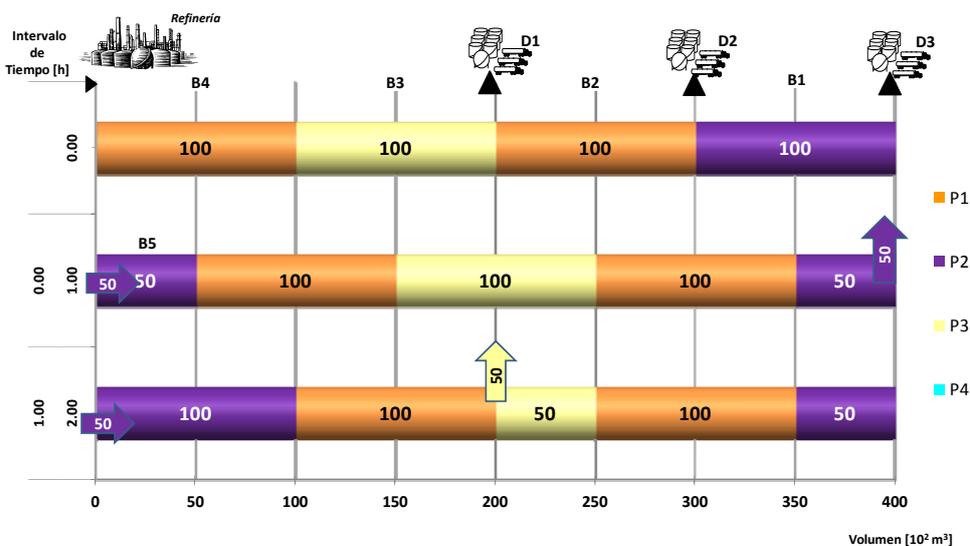


Figura 1.3 Representación de las operaciones de inyección y entrega de lotes en el tiempo

I.3. COMPONENTES DE UN POLIDUCTO

Las redes de poliductos están compuestas por diversos conductos que operan conjuntamente para llevar a cabo el movimiento de material de un punto a otro. Tal como se representa en la Figura I.4, los principales elementos de un sistema son: la estación de inyección inicial, estaciones de bombeo, estaciones de entrega intermedias, válvulas de bloqueo y estaciones de entrega finales.

La estación de inyección inicial, compuesta principalmente por tanques de almacenamiento y bombas, es el punto donde los diferentes productos ingresan en la red de poliductos. La inercia, la gravedad, la fricción del líquido con las paredes de la tubería y la viscosidad oponen resistencia al movimiento del material en la tubería. Por este motivo, es necesario ubicar un conjunto de estaciones de bombeo a lo largo de la línea, las que se encuentran en balance hidráulico, no necesariamente separadas a intervalos idénticos. Su localización dependerá de la topografía del terreno, el tipo de producto a ser transportado, como así también de las condiciones operativas del sistema.

Las estaciones o terminales intermedias y finales posibilitan la entrega de material en distintos puntos a lo largo de la línea. Su disposición esta mayoritariamente determinada por la cercanía a los grandes centros de demanda.

Para detener el flujo de líquido por tareas de mantenimiento programadas, o bien por roturas de dispositivos, se hace uso de válvulas de bloqueo, las cuales permiten aislar segmentos específicos del poliducto. Habitualmente se encuentran cada 50 km, dependiendo de la naturaleza del producto que se transporta, la trayectoria de la línea y el medio operativo. A su vez, en la práctica se utiliza un tipo especial de válvulas, denominadas

válvulas reguladoras, que permiten al operador variar la presión dentro del ducto. Estos sistemas son particularmente ventajosos en terrenos montañosos cuando la presión debe disminuirse luego de transitar una zona elevada.

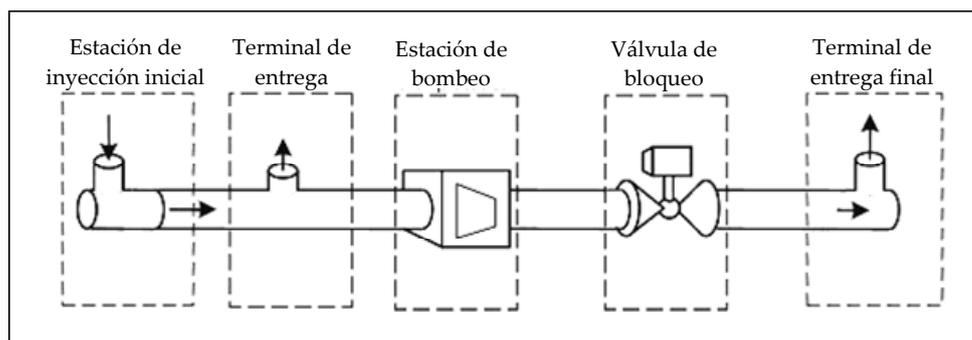


Figura 1.4. Componentes básicos de un poliducto

I.4. CONTROL Y OPERACIÓN REMOTA DE POLIDUCTOS

Los avances tecnológicos en materia de monitoreo remoto han hecho posible que los sistemas de poliductos puedan ser operados desde un único centro de control, optimizando la seguridad y eficiencia del transporte. Esto se lleva a cabo mediante el uso de tecnología SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

Un sistema SCADA incluye un hardware de señal de entrada y salida, controladores, interfaz hombre-máquina, redes, comunicaciones, base de datos y software (ver Figura 1.5).

El término SCADA usualmente se refiere a un entorno informático centralizado que monitorea y controla un sistema de transporte que se extiende sobre grandes distancias. La mayor parte del control se realiza en forma automática desde la propia Unidad Terminal Remota (RTU), a través de un Controlador Lógico Programable (PLC). En general las funciones de control del servidor central están restringidas a reajustes básicos. La

realimentación del lazo de control es cerrada a través del RTU o el PLC, mientras que el sistema SCADA monitorea el desempeño general de dicho lazo.

Desde el centro de control pueden regularse válvulas y estaciones de bombeo ubicadas a lo largo de toda la línea, para lograr que los productos avancen según lo programado. A través de sensores en la ruta del ducto se recibe información en tiempo real, lo que posibilita que desde el centro de control se identifiquen y solucionen eventuales problemas o irregularidades. En caso de presentarse eventuales pérdidas o roturas, se interrumpe inmediatamente el funcionamiento, aislando la porción del ducto afectada. De esta forma se busca proteger al medio ambiente, reduciendo al mínimo posible la cantidad de producto que pueda ser derramado. Gracias a esta tecnología, los poliductos representan en la actualidad la opción más segura para el transporte de combustible.

Cuando se diseña un poliducto no sólo se proyecta lo relacionado a la construcción de la línea propiamente dicha, sino también lo relativo al conjunto de elementos que dan soporte a la operación remota.

El conjunto de dispositivos de campo se constituye de instrumentos de medición, unidades para la recolección de información y sistemas de comunicación. Estos elementos incluyen medidores y transmisores de temperatura, presión, densidad y flujo, entre otros, que se instalan en puntos específicos como las terminales de inyección y entrega, y las estaciones de bombeo.

La información de campo es recolectada y transmitida al control central en tiempo real por una Unidad Terminal Remota (RTU). Para ello se utiliza tecnología de comunicación más avanzada como canales satelitales, conexiones de microondas y telefonía celular.

Los sistemas SCADA permiten que el operador controle los poliductos a través de Interfaces Hombre - Máquina o HMI ("Human Machine Interface"), las cuales reflejan las condiciones de la línea en todo momento, como así también envían comandos operativos, tales como la apertura y cierre de válvulas, y el encendido y apagado de equipos. Un HMI puede tener también vínculos con una base de datos para proporcionar tendencias, datos de diagnóstico y manejo de la información, así como un cronograma de procedimientos de mantenimiento, información logística, incluso sistemas expertos con guía de resolución de problemas.

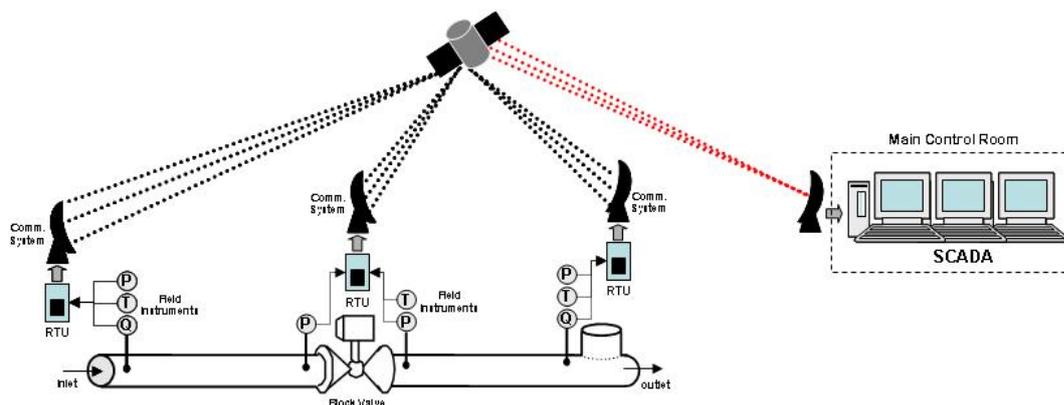


Figura 1.5. Control y operación de un poliducto mediante un sistema SCADA.

Si bien estos sofisticados sistemas permiten automatizar el control de poliductos, la planificación sigue estando bajo la responsabilidad del operador, quien debe determinar de qué forma se realizará la entrega de material a las distintas terminales. Dado que se trata de una tarea de alta complejidad por el gran número de restricciones operativas que deben considerarse, el desarrollo de una herramienta de soporte a la toma de decisiones a nivel operativo resulta de gran utilidad.

I.5. FUNCIONAMIENTO DE LOS POLIDUCTOS

Habitualmente los productos se transportan desde terminales de carga o refinerías hacia terminales de destino. En el origen, el material se almacena en grandes tanques hasta el momento en que se inyecta en el poliducto. Asimismo, una vez transportados, los combustibles son retenidos temporalmente en tanques ubicados en las terminales de destino.

En las estaciones de origen y destino, cada tanque se encarga de almacenar un único combustible, para evitar operaciones de purga y limpieza durante los ciclos habituales de carga y descarga.

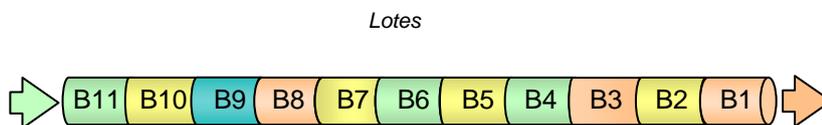
Además de los tanques de almacenamiento en las cabeceras y terminales del poliducto, se dispone de tanques auxiliares a lo largo de la línea. Estos últimos se utilizan generalmente para interrumpir el flujo de material en tránsito dentro del conducto debido a una bifurcación de la línea, variación en el tamaño o en la capacidad del ducto, cambios en el modo de operación del sistema, etc. Los tanques auxiliares confieren la flexibilidad necesaria para detener o demorar temporalmente el tránsito de algunos lotes de producto refinado. Las operaciones del poliducto que requieren la detención y el posterior restablecimiento del flujo tienden a generar un mayor volumen de interfases. Por lo tanto, el hecho de mantener el flujo de productos en tránsito de manera continua, sin necesidad de recurrir a los tanques de retención, favorece las condiciones operativas del sistema. A este modo operativo se lo denomina habitualmente "tightlining".

La operación de los poliductos difiere según este trabajo en modo "segregado" o en modo "fungible". En la operación tipo segregada la identidad de cada unidad de producto transportado se conserva durante todo el trayecto dentro del conducto, entregándose en el destino el mismo material que fue inyectado en el origen. Por el contrario, en las operaciones

tipo fungible o consolidado, el operador del poliducto no está forzado a entregar en el destino exactamente el mismo lote de producto que ha sido introducido en el origen. Para ello, el producto transportado debe poseer especificaciones claras que confieran la posibilidad de intercambiar un producto estándar entre diferentes proveedores y centros de consumo.

En la Figura I.6 se muestran las características principales de ambos modos de operación.

Modo Batch ó Segregado



Modo fungible ó Consolidado

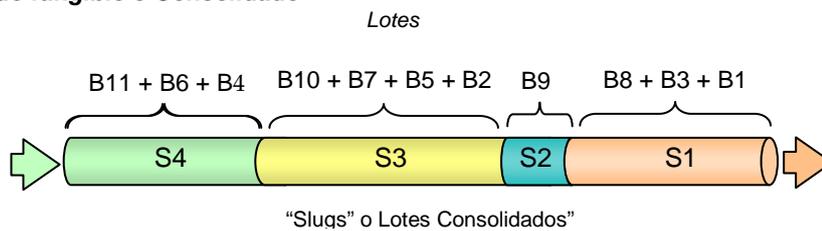


Figura I.6. Modos de operación de los poliductos

Las operaciones en modo consolidado tienden a minimizar la generación de interfases, permiten una utilización más eficiente de los tanques de almacenamiento y posibilitan operaciones de división de corriente ("split-stream"). En una operación "split-stream", los envíos destinados a distintas terminales pueden ser transportados en forma conjunta. Si bien este modo de operación es el más eficiente, sólo puede ser empleado para el transporte de productos genéricos.

En operaciones consolidadas, se utilizan tanques de almacenamiento de gran tamaño para acumular o despachar múltiples envíos de productos

refinados idénticos. Por el contrario, en el modo segregado cada envío de material se almacena en un tanque diferente. Consecuentemente los tanques de almacenamiento tienden a ser de menor tamaño pero más numerosos.

I.6. TOPOLOGÍA DE POLIDUCTOS

Los sistemas de transporte de combustibles por poliductos pueden clasificarse de acuerdo a su estructura y a la cantidad de nodos de inyección y de recepción de productos

- (a) Poliductos simples 1 a 1: único origen, único destino, estructura lineal



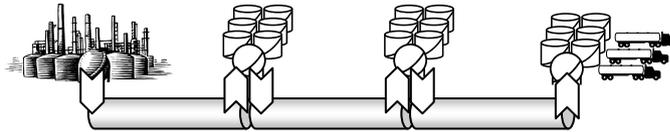
- (b) Poliductos simples 1 a N: único origen, múltiples destinos, estructura lineal



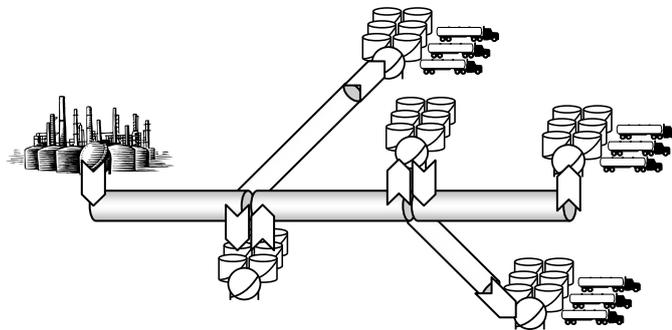
- (c) Poliductos simples M a N: M estaciones de ingreso y N terminales de destino con estructura lineal



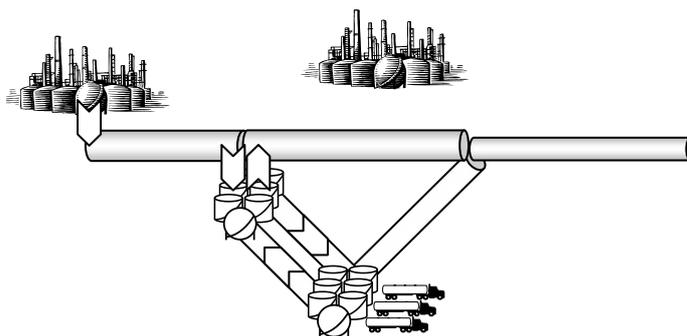
- (d) Redes de poliductos simples interconectados en serie: Nodos de ingreso, terminales de recepción, y estaciones intermedias con doble propósito.



- (e) Redes de poliductos simples configurados en árbol: los poliductos individuales no están conectados en serie, sino que presentan una estructura ramificada. Las ramificaciones de menor diámetro transportan productos a grandes consumidores



- (f) Redes de poliductos troncales con estructura en malla, compuesto de tuberías múltiples que comunican nodos de producción y nodos de recepción a través de uno o más caminos.



Otra clasificación que suele realizarse obedece a la dirección del flujo de los productos transportados. Si el fluido se mueve en una única dirección, se dice que la tubería es unidireccional, mientras que los poliductos bidireccionales pueden transportar los líquidos en ambas direcciones.

A lo largo del desarrollo de esta tesis se trabajará con poliductos unidireccionales con configuraciones simples.

En las secciones siguientes se realiza un análisis exhaustivo del estado del arte en lo que refiere a programación de las operaciones de poliductos.

I.7. DESCRIPCIÓN DE LA COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA DE TRANSPORTE POR POLIDUCTOS

La planeación del transporte de productos en poliductos involucra el desarrollo de dos programas distintos que deben coordinarse entre sí: (a) el programa de operaciones de inyección de combustibles en las terminales de ingreso, y (b) el programa de entrega de productos desde el poliducto hacia los centros de recepción. En el primer caso, el problema consiste en seleccionar y dimensionar una sucesión de lotes de tipos de productos compatibles entre sí a ingresar desde cada fuente de suministro, buscando minimizar la degradación de productos en las interfases. Esto implica definir el ordenamiento cronológico de las inyecciones en los diferentes

puntos de ingreso. En ciertas configuraciones, la impulsión simultánea de lotes en más de un nodo facilita la reducción de costos por un mejor aprovechamiento del recurso de transporte, aunque el problema reviste aristas más complejas. Por un lado, la presencia de múltiples terminales de ingreso origina que la secuencia de lotes en tránsito no siga generalmente un ordenamiento cronológico. Además, un mejor control del funcionamiento del poliducto obliga a que las inyecciones de productos que se ejecutan en paralelo no interactúen entre sí. O sea, producen el movimiento del fluido a lo largo de distintas secuencias de segmentos de poliductos (llamados segmentos activos) sin ningún elemento en común. De igual modo, la operación de cada tramo de tubería debe considerar la puesta en marcha de una serie de bombas de impulsión que tiene un consumo energético cuyo costo unitario puede estar expuesto a diferencias notorias por franja horaria. En esos casos, el funcionamiento intermitente de las estaciones de bombeo, con paradas en las franjas de mayor costo unitario, podría resultar la opción más conveniente. Por otro lado, el programa de entrega de combustibles a las terminales de distribución requiere de un seguimiento riguroso de la posición y el tamaño de los envíos que transitan por la línea.

A partir de la condición de incompresibilidad de los líquidos transportados, que llenan todo el interior del conducto, la derivación de material ocurre en simultáneo con la introducción de un volumen equivalente en un nodo de acceso aguas arriba. Un mismo lote puede estar destinado a diversos centros de recepción, y el "corte" de cada fracción de lote debe verificar las condiciones de accesibilidad del mismo a la terminal de destino, que dependen de la localización del envío respecto de la conexión física del poliducto a esa terminal. Todo ello exige un preciso

balance volumétrico de entradas y salidas, que debe cumplirse durante todo el programa.

I.8. REVISIÓN LITERARIA: ANÁLISIS PRELIMINAR DEL ESTADO DEL ARTE

Los primeros desarrollos en el tema plantearon una representación discreta del contenido de poliductos con un único punto de inyección, y fueron aplicados a programas cíclicos de bombeo (Hane y Ratliff, 1995). Conociendo de antemano el tamaño de los lotes a inyectar se buscó atender los requerimientos mensuales de los destinos, minimizando el número de detenciones parciales de la línea. Posteriormente a través de diversos métodos de descomposición, se logró abordar el dimensionamiento y la secuenciación de lotes de combustibles en el poliducto usando programas acíclicos, que aseguran la compatibilidad entre envíos adyacentes. Afortunadamente, hacia el año 2004, se logró el primer modelo riguroso de planeación de poliductos, a través del cual se puede tener un control preciso del transporte de lotes a partir de una representación continua de los dominios de tiempo y volumen.

En las secciones siguientes se presenta un resumen de los trabajos de mayor relevancia publicados en relación a la problemática estudiada. Los mismos son agrupados, de acuerdo al tipo de metodología de resolución empleada, en dos grandes categorías: (1) métodos de descomposición de naturaleza híbrida heurística–algorítmica; (2) metodologías basadas en modelos de programación matemática de tipo discreto ó continuo, según la forma de representación de los dominios de tiempo y volumen.

I.8.1. Métodos de descomposición

Las técnicas de descomposición utilizadas para la programación operativa de poliductos combinan una serie de herramientas tales como reglas

heurísticas, simulación de eventos discretos, programación por restricciones, y modelos de programación matemática mixta entera (MILP). Dichas herramientas son aplicadas secuencialmente para ir tomando las decisiones de manera gradual (Sasikumar y colab., 1997; Moura y colab., 2008; García-Sánchez y colab., 2008; Boschetto y colab., 2010; Lopes y colab., 2010). Al respecto, se ha publicado una serie de metodologías híbridas que consisten en descomponer el proceso de "scheduling" del poliducto en un número determinado de etapas y resolver secuencialmente cada una de ellas aplicando diferentes técnicas de solución.

Neves y colab. (2007) presentaron uno de los primeros enfoques de descomposición jerárquica para obtener el plan de las operaciones sobre un horizonte de programación mensual. El esquema de descomposición presenta en el nivel superior un bloque de pre-procesamiento heurístico que tiene en cuenta los requerimientos de productos en las terminales de distribución, el plan de producción en las refinerías, la compatibilidad de los productos entre sí y un tamaño característico de los lotes de cada producto para proponer el conjunto de lotes a transportar y la secuencia de inyección de los mismos. Adicionalmente, el bloque heurístico provee ventanas de tiempo para las operaciones de inyección y entrega. En el nivel siguiente, la información obtenida del bloque de pre-procesamiento es utilizada por una formulación matemática, basada en una representación continua del tiempo, de tipo MILP para determinar los tiempos exactos de inicio y finalización de las operaciones de inyección y entrega. Debido a que se consideran costos de energía eléctrica, el modelo incluye variables binarias para evitar operaciones de bombeo en horarios pico de costos de energía.

Por su parte, Mori y colab. (2007) desarrollaron un modelo de simulación de eventos discretos para programar las operaciones de ingreso de lotes de productos y su derivación a terminales en una red de poliductos del mundo real. La red consiste en una serie de líneas simples que conectan múltiples refinерías, puertos, y centros de distribución entre sí, y transportan una serie de derivados del petróleo.

Moura y colab. (2008), reportaron otro enfoque híbrido que combina una heurística constructiva aleatoria con modelos de programación de restricciones ("constraint programming": CP). La fase de planeamiento, en el nivel superior, utiliza heurísticas para crear el conjunto de lotes a ser inyectados (órdenes de entregas), especificando su volumen, origen, depósito de destino, tipo de producto, ruta a seguir, y "due-dates" de las entregas. Por lo tanto, se supone que el poliducto opera en modo por lotes, con cada lote de producto conteniendo un único destino. En el nivel inferior, se programa la inyección del conjunto de órdenes de entrega propuesto, determinando la secuencia de tiempos de iniciación y finalización de las operaciones de bombeo en cada fuente para cumplir con las fechas de entregas programadas usando un par de modelos de tipo CP.

Por otro lado, García-Sánchez y colab. (2008) presentaron una metodología híbrida que combina la metaheurística llamada "tabu search" con un modelo de simulación de eventos discretos para resolver un problema de "scheduling" de poliductos del mundo real. El método de "tabu search" es una técnica de inteligencia artificial que sirve de guía en el proceso de búsqueda para eventualmente identificar programas de operaciones convenientes. "Tabu Search" es una técnica de búsqueda local usada en la solución aproximada de problemas de optimización altamente combinatorios. El algoritmo apunta a hallar mejores soluciones en la

vecindad de la solución actual, progresando esa búsqueda en forma iterativa de una solución a otra hasta que se satisface un criterio de parada previamente definido. El objetivo del "tabu search" es obtener un conjunto de "schedules" satisfactorios, de acuerdo a valores objetivos máximos denominados "targets", los cuales no pueden ser superados para que el "schedule" sea considerado satisfactorio. Dichos "schedules" no-óptimos son subsecuentemente testeados por un modelo de simulación capaz de evaluar la calidad de los mismos incluyendo elementos complejos del problema, difíciles de considerar si se utilizaran métodos exactos. Los criterios de evaluación usados fueron: (i) la demanda insatisfecha por faltantes; (ii) el número de interfases prohibidas; (iii) el tiempo en que las interfases se encuentran detenidas dentro del ducto; (iv) los bloqueos; (v) los costos asociados a las interfases; (vi) el volumen no entregado. Para cada uno de estos criterios se definen valores objetivos máximos o "targets", los cuales no pueden ser superados para que un "schedule" sea considerado satisfactorio. Mediante la utilización de modelos de simulación resulta posible evaluar la calidad de los "schedules" incluyendo diversos elementos complejos del problema. El modelo propuesto fue testado en la resolución de un caso de estudio de la Compañía Logística Petrolera de España (CLH). El sistema consta de seis nodos, incluyendo una refinería que alimenta dos ramas, conectadas a un nodo divisor y cuatro terminales. El horizonte de tiempo es de cuatro semanas, dentro del cual todo el volumen planeado debe ser entregado.

Por su parte Boschetto y colab. (2010) reformularon el enfoque híbrido de Neves y colab. (2007) utilizando una nueva estrategia de descomposición que, ahora involucra tres diferentes bloques: (i) un bloque de asignación de recursos que genera las secuencias candidatas de inyecciones de nuevos

lotes, (ii) un bloque de pre-análisis especificando los volúmenes específicos a ser bombeados desde los nodos fuentes y las terminales de destino, así como también ventanas de tiempos para el inicio y finalización de las operaciones de entregas en cada depósito, y (iii) un modelo de tipo MILP determinando el tiempo exacto de las operaciones de inyección y entrega en cada depósito. En contraste con las formulaciones continuas, estos enfoques híbridos ofrecen "schedules" detallados de operaciones. Este tipo de herramientas fue aplicado a diversos casos de estudios reales que involucran sistemas de tuberías más bien complejos que transportan un gran número de productos, pero los datos informados para la resolución de esos ejemplos son limitados. Por lo tanto, es difícil reproducir las soluciones reportadas. Además, dichas herramientas no garantizan la optimalidad de la solución encontrada.

1.8.2. Metodologías basadas en la resolución de modelos matemáticos

Los métodos basados en modelos matemáticos buscan hallar la mejor programación de operaciones resolviendo eficientemente esas formulaciones. Más aún, este tipo de metodologías realizan un seguimiento explícito de la evolución del contenido del poliducto en el tiempo. Sin embargo, las representaciones propuestas manejan de manera diferente los dominios de tiempo y volumen. Como resultado, estos métodos se agrupan en dos categorías: (i) enfoque de programación matemática con representación discreta de la escala de tiempo y (ii) enfoque con representación continua del horizonte de tiempo.

1.8.2.1. Enfoques de programación matemática de tipo discreto

La mayoría de las metodologías publicadas para generar el programa detallado de operaciones de inyección y de entregas a terminales se basan

en representaciones discretas. Dichos aportes dividen el volumen del poliducto en un número de "packs" conteniendo un único producto, y el horizonte de planificación en un número de intervalos de igual o distinta longitud (Rejowski y Pinto, 2003; Magatão y colab., 2004; Zyngier y Kelly, 2009; Herrán y colab., 2010). Generalmente emplean una discretización del tiempo uniforme y un esquema de particionado del volumen en "packs" de igual o diferente tamaño. Para poliductos de diámetro constante, las formulaciones de tipo discreto suponen que el volumen de cada segmento contiene un número entero de paquetes de productos de idéntico tamaño, y que el horizonte de planeación se divide en un número entero de intervalos de tiempo de una duración fija e igual para todos (Rejowski y Pinto, 2003, 2004; Magatão y colab., 2004). Cada vez que un nuevo "pack" ingresa en el origen de la tubería, otro "pack" del mismo tamaño es derivado hacia una terminal receptora, es decir, se emplea la política de tipo: "one pack in" – "one pack out". De este modo, todos los "packs" contenidos en el segmento que une el origen con la terminal activa, se mueven hacia la siguiente posición, excepto el último "pack" que es transferido a la estación terminal. Más aún, cada "pack" es inyectado a un mismo caudal dado por la relación entre el tamaño del "pack" y la duración del intervalo de tiempo.

Un enfoque discreto concibe la operación del poliducto como una secuencia de eventos, y en cada evento el programador debe decidir qué paquete de producto inyectar en la línea, desde la estación de ingreso; qué paquete de producto simultáneamente descargar desde la tubería y en qué terminal realizar la descarga. Debido a que los modelos discretos son representaciones aproximadas del problema, solamente realizando una discretización muy fina se podrán alcanzar "schedules" factibles. Como

consecuencia, la programación óptima de operaciones sólo se podrá obtener resolviendo formulaciones de gran tamaño, incluso para horizontes de tiempo relativamente cortos.

Rejowski y Pinto en sus publicaciones de los años 2003 y 2004, propusieron una variante del modelo discreto para poliductos que comprenden tuberías de diferentes diámetros. Generalmente, los segmentos más alejados del origen del poliducto, presentan diámetros menores. El modelo de tipo discreto modificado, usa "packs" de un único producto con distintas capacidades para los segmentos de diámetros diferentes; es decir, "packs" más pequeños para los tramos de diámetros menores. Si un "pack" de un producto es transferido de un segmento de mayor diámetro a otro de menor diámetro, obligatoriamente una porción del mismo deberá despacharse a la terminal ubicada en la unión de los dos segmentos para compensar la diferencia de tamaño entre los "packs" de una y otra sección. Luego, la cantidad de producto contenida en el último "pack" del segmento con mayor diámetro puede ser despachada en su totalidad hacia la terminal asociada, o bien, despachar una parte a dicho depósito dejando al resto del "pack" ingresar y proseguir su movimiento a lo largo de la tubería de menor diámetro siguiendo una relación fija. Dicha relación está dada por el cociente entre la diferencia de tamaños de "packs" y el volumen del "pack" en la tubería de menor diámetro. En el último caso, siguiendo la regla "one pack in-one pack out", un "pack" de menor tamaño será simultáneamente transferido hacia un depósito ubicado en el extremo de algún segmento de menor diámetro. A pesar de las limitaciones del modelo, dicho enfoque ha sido el primero en manejar, de una forma muy particular, entregas simultáneas a múltiples depósitos durante la misma

corrida de bombeo, en poliductos con una única fuente. Sin embargo, está claro que la elección de las entregas simultáneas no es una decisión del modelo sino un artilugio para tener en cuenta la reducción del diámetro de la tubería.

Posteriormente, Rejowski y Pinto (2008), generalizaron su enfoque para manejar un horizonte de planeación que comprenda intervalos de tiempo de duración ajustable que permitan cambios en el caudal de inyección. Sin embargo, el volumen es todavía particionado en "packs" simples de menor tamaño, de manera similar a los modelos discretos previos.

Por su parte, Herrán y colab. (2010) presentaron una formulación matemática de tipo MILP para el programa detallado de las operaciones de sistemas de poliductos interconectados, incluyendo líneas reversibles. El modelo, basado en un enfoque discreto, divide, por un lado, el horizonte de planeación en intervalos de tiempo de igual duración; y por otra parte, cada segmento de la tubería es dividido en "packs" de igual volumen, cada uno conteniendo un único producto. Además, cada "pack" es inyectado a un mismo caudal, independientemente del producto asociado. No se permite la transferencia directa de "packs" entre tuberías consecutivas. Por lo tanto, cada vez que un "pack" entra a la tubería, otro "pack" se moverá al depósito ubicado en el otro extremo de la misma. Adicionalmente, el modelo permite la inyección de "packs" en simultáneo, desde distintos puntos de ingreso.

1.8.2.2. Enfoques de programación matemática de tipo continuo

Los enfoques basados en representaciones matemáticas continuas de los espacios de tiempo y volumen conducen a formulaciones más rigurosas del problema de programación de las operaciones de poliductos. La primera formulación de tipo continua para el problema de "scheduling" de un

poliducto troncal transportando productos desde una única fuente hacia múltiples destinos fue propuesta por D.C Cafaro y J. Cerdá en el año 2004. Mediante la adopción de una representación continua en tiempo y volumen, se obtiene una descripción más rigurosa del problema y una reducción importante en el número de variables binarias utilizadas en el modelo. El objetivo problema consiste en establecer la secuencia óptima de inyecciones de lotes en el poliducto, sus volúmenes iniciales y la asignación de producto a cada lote, de modo de: (i) satisfacer la demanda de productos en el tiempo pactado, (ii) mantener el nivel de stock de productos en tanques de origen y destinos dentro del rango permitido, (iv) minimizar la suma de los costos de bombeo, transición, detención del sistema, retrasos en las entregas, y mantenimiento de combustibles en inventario. Al mismo tiempo, se realiza un seguimiento preciso de la variación del tamaño y las coordenadas de los lotes en tránsito a lo largo del poliducto, así como de la evolución del stock en los tanques de la refinería y los depósitos. El programa de transporte resultante indica el tipo y cantidad de combustible a inyectar, el caudal de bombeo asociado, así como los tiempos de inicio y finalización de cada corrida.

El modelo fue luego extendido para considerar horizontes de planeación multi-período y reprogramación de las operaciones debido a eventos inesperados y cambios en las fechas prometidas de entrega en las terminales de destino (Cafaro y Cerdá, 2008a). El objetivo consiste en la actualización dinámica de la secuencia y de los volúmenes originales de los nuevos lotes de productos a ser bombeados en la línea, utilizando un horizonte rodante multi-período. El modelo MILP desarrollado apunta a la atención de la demanda de cada producto en cada terminal a los tiempos pactados, manteniendo los niveles de inventario en tanques de

almacenamiento en refinería y terminales dentro de límites permitidos. El objetivo es minimizar la suma de los costos totales de bombeo, set-up, mantenimiento de inventario, "backorders", entre otros, haciendo un seguimiento del tamaño y posición de cada "batch" dentro del ducto. Al igual que en el modelo anterior, el programa generado indica detalladamente el tipo y cantidad de producto a ser inyectado, el tiempo de comienzo y finalización de cada corrida de bombeo y la tasa o caudal a la cual se transportan los lotes. Los resultados muestran que la secuencia de inyecciones obtenida con este enfoque difiere de la hallada con técnicas estáticas. Se obtiene un número mayor de corridas de bombeo que resultan ser de una duración más corta.

A su vez, Relvas y colab. (2006) modificaron el modelo continuo de Cafaro y Cerdá (2008a) para aplicarlo a un caso más simple: un poliducto con una única fuente y sólo una terminal de distribución, pero teniendo en cuenta nuevas restricciones prácticas. En efecto, dichos autores consideraron (a) el período de espera del lote en el tanque de control de la terminal aguardando por el resultado del procedimiento de control de calidad y (b) el cumplimiento de las demandas diarias de productos en la única terminal de destino durante un horizonte de planeación mensual. La restricción (b) aumenta enormemente el tamaño del modelo y el esfuerzo computacional para resolverlo. Esto obligó a los autores a predefinir de manera parcial la secuencia de productos a inyectar con el objeto de reducir significativamente el número de variables binarias del modelo. 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" (de espera del lote en el tanque de control) diferentes para cada tipo de producto, (ii) caudales de bombeo

variables y (iii) detenciones momentáneas de la línea en franjas de tiempo de alto costo unitario de la energía. 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.

Más tarde, D.C Cafaro y J. Cerdá (2008b), a través de una formulación matemática MILP más eficiente, lograron obtener el "schedule" preciso de inyección y descarga de lotes, así como las operaciones de almacenamiento y despacho de combustibles, en configuraciones con un único origen y un solo destino, sin predefinir la secuencia de productos transportados.

A posteriori, se desarrollaron nuevos modelos de tipo continuo para abordar configuraciones más complejas, como las líneas con múltiples fuentes o nodos de inyección de productos. En estos sistemas, las terminales de inyección pueden operar en forma secuencial (Cafaro y Cerdá, 2009; Castro, 2010) o en simultáneo (Cafaro y Cerdá, 2010).

En efecto, los citados autores en su trabajo del año 2009 proponen una nueva formulación matemática MILP de escala continua para abordar el problema de programación de las operaciones de inyección y entrega en poliductos con múltiples fuentes de inyección, que pueden operar tanto en modo segregado como fungible. No obstante, en todo momento, una única fuente permanece activa, esto es, impulsando combustibles hacia el interior de la tubería. El objetivo del modelo consiste en obtener la secuencia de

lotes a inyectar desde cada fuente, de modo que el poliducto opere a su máxima capacidad, satisfaciendo la demanda de las terminales de destino en tiempo y forma, a un mínimo costo de bombeo y reprocesamiento de interfases.

A diferencia de los sistemas con ingreso único, la inyección de lotes en puntos intermedios del poliducto hace que las corridas de bombeo y los lotes de productos dentro de la tubería no se ordenen del mismo modo. En consecuencia, el nuevo enfoque maneja ambos elementos como entidades matemáticas distintas. A partir de esta idea sencilla, la formulación 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 vacío alcanza la posición correcta, comienza la corrida de inyección de combustible en esa estación y el lote toma dimensiones finitas. Por medio de la asignación de productos a lotes ordenados se establece la secuencia de transporte de los combustibles, y la evaluación de los costos de interfases se convierte en una tarea mucho más simple.

En el año 2010, los mismos autores extendieron el modelo para facilitar la realización de inyecciones simultáneas, contemplando al mismo tiempo la existencia terminales de doble propósito (inyección y descarga). Al igual que en el modelo anterior, el objetivo perseguido es el de programar las operaciones de inyección y distribución de combustibles, 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. Con el desarrollo de este

trabajo se logra una mejora notable respecto del aprovechamiento de la capacidad de transporte, reduciendo sensiblemente los tiempos requeridos para atender las demandas de los depósitos.

Hacia el año 2011 aparecen las primeras publicaciones que resuelven el problema de programación de las operaciones de inyección y entrega en estructuras tipo árbol, esto es, redes de poliductos ramificados con una única fuente (MirHassani y Jahromi, 2011; Cafaro y Cerdá, 2011a); y por último, estructuras de redes de poliducto tipo malla, con múltiples fuentes y destinos, altamente interconectados (Cafaro y Cerdá 2012).

Más allá del marcado avance en cuanto a técnicas de dimensionamiento y secuenciación de lotes, la programación detallada de los despachos de combustibles hacia las terminales receptoras, la optimización del caudal de transporte de los combustibles, la configuración de bombas en las estaciones impulsoras, y la minimización de las detenciones parciales de la línea, son algunas de las problemáticas importantes que aún se encuentran en un estado de análisis elemental (Rejowski y Pinto, 2008). Teniendo en cuenta el estado del arte en el área, se definirán en el próximo capítulo los nuevos desafíos a enfrentar en esta tesis para dar respuesta a problemas de singular importancia para las compañías que operan poliductos, a través del desarrollo de herramientas altamente eficientes para su aplicación en la industria.

Capítulo II

NUEVOS DESAFÍOS AFRONTADOS EN ESTA TESIS

II.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A lo largo de este capítulo se intentarán definir los nuevos desafíos que se plantean en el área de programación de las operaciones de transporte de combustibles por poliductos, con el fin de que el lector pueda comprender la motivación del presente trabajo de tesis.

II.1.1. Programación de las operaciones de poliductos

Las redes de poliductos han probado ser la forma más eficiente y confiable para el envío de grandes volúmenes de combustibles líquidos a lo largo de extensas distancias. A diferencia de otros medios de transporte, pueden operar sin interrupciones, con prácticamente nula incidencia de los problemas climáticos. Asimismo, ofrecen importantes ventajas en cuanto a seguridad y cuidado ambiental, ya que no congestionan rutas, ni producen contaminación, dado su menor índice de derrame en comparación con otros medios de transporte.

Los poliductos movilizan una amplia gama de productos tales como naftas de distintos grados, gas-oil, fuel-oil, jet-fuel y kerosene doméstico, para las principales compañías petroleras del mundo. Los productos se introducen en la línea uno tras otro, impulsando cada uno a los lotes en tránsito, desde el origen o cabecera del poliducto hacia los destinos o terminales del sistema de distribución. Dada la incompresibilidad de los líquidos, la entrega de material desde el poliducto a los depósitos ubicados a lo largo de la línea se debe realizar simultáneamente con la inyección de un nuevo "batch".

El proceso de planeación de las operaciones en un poliducto busca definir los lotes de productos a inyectar, el tamaño de los lotes, la secuencia de inyección de los mismos y la asignación de cada lote a los diferentes destinos. Más aún, se apunta a optimizar la operación del conjunto de válvulas y unidades de impulsión de la red de poliductos, a partir del programa de corridas de bombeo y descargas a terminales establecido por el planificador.

La programación de un poliducto es una tarea sumamente compleja con muchas restricciones a considerar en su elaboración, entre las que se pueden citar: los programas de producción de las refinerías usuarias del poliducto; las demandas de productos por parte de las terminales de distribución; las restricciones operacionales que prohíben la inyección sucesiva de pares de derivados de petróleo incompatibles entre sí debido a problemas de contaminación por mezclado, y la operación intermitente del poliducto por detenciones en horas diarias "pico" de consumo por el mayor precio de la energía eléctrica. Además, se deben tener en cuenta los inventarios disponibles inicialmente en los tanques de las terminales de

origen y de destino, y aquéllos que se encuentran en el interior del poliducto al comienzo del horizonte de planeación.

Una apropiada programación de operaciones de un poliducto apunta a: (i) atender los requerimientos de los centros de demanda en tiempo y forma durante el horizonte de programación; (ii) minimizar el costo de las operaciones del poliducto (consumo de energía eléctrica, reprocesamiento de interfases, mantenimiento de inventarios, atrasos en las entregas) mientras trabaja a plena capacidad; (iii) mejorar la información que reciben las refinerías comitentes sobre el "status" del movimiento de los productos enviados a través de los poliductos y (iv) tomar ventaja de la variabilidad del costo de la energía para bombeo, usualmente dependiente de la franja horaria.

Dada la complejidad del problema que se plantea, los operadores de poliductos requieren información precisa sobre el estado del sistema en lo referente al movimiento de productos, para lo cual debe realizarse un seguimiento riguroso de la localización de los lotes en la tubería. En resumen, para operar eficientemente un sistema de poliductos es elemental el desarrollo de herramientas que determinen por un lado, la secuencia de inyección de los lotes, la cantidad de producto a insertar desde las refinerías para abastecer los centros de distribución, y por el otro, la secuencia de corridas de bombeo a realizar, indicando tipo y cantidad de producto a inyectar, e intervalo de tiempo durante el cual se lleva a cabo cada corrida.

En general, para coordinar los envíos a los clientes, toda solicitud debe ser colocada en el sistema con un mes de anticipación. Esta solicitud, también llamada "nominación", constituye una orden de carga que combina datos sobre el cliente, producto, volumen, origen y fecha de entrega.

Para facilitar su trabajo, los operadores de poliductos elaboran por lo general un programa de recurrencia mensual compuesto por un conjunto de ciclos cuya duración puede ser de 7, 10 ó 14 días. Las nominaciones son divididas en tantas porciones o lotes de igual tamaño como número de ciclos o períodos haya por mes. Esto origina un mayor número de "batches" en tránsito y un incremento importante en el nivel de contaminación porque aumenta la cantidad de interfases. A cada lote se le asigna un número de identificación, el cual permanece inalterable desde el momento en el que la unidad ingresa a la línea, hasta que alcanza el destino establecido, permitiendo hacer un seguimiento dentro del conducto. En cada ciclo, se respeta el mismo programa de trabajo.

La información básica del proceso de programación incluye la secuencia de lotes y las tasas de bombeo que determinan el caudal de flujo de la corriente a lo largo de la tubería.

Al establecer la secuencia de inyección de lotes, las herramientas conocidas no especifican con precisión el orden de las derivaciones. Estas 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.

II.2. NUEVOS DESAFÍOS A AFRONTAR

Por la complejidad de los problemas operativos que se deben resolver, existe la necesidad de brindar a los operadores de poliductos herramientas de soporte eficientes para programar las operaciones de inyección y entrega. A continuación se ejemplifican algunos aspectos operativos que aún no han sido considerados por los enfoques de programación basados

en modelos matemáticos con representación continua del horizonte de tiempo y del volumen del poliducto.

En la Figura II.1 se muestra una representación gráfica de las inyecciones y entregas asociadas a la operación de inyección del lote *B5* en un poliducto con una única fuente y tres terminales de distribución. Este tipo de esquema es de gran utilidad para realizar un seguimiento de los lotes y sus contenidos dentro de la tubería, en cada intervalo de tiempo. Adicionalmente brinda información acerca de la cantidad y tipo de producto inyectado así como las unidades derivadas a cada depósito durante el tiempo de ejecución de la corrida de bombeo. En dicha figura se pueden distinguir dos planes operativos, en cierta forma similares, pero con un diferente nivel de detalle: En la parte superior se muestran las operaciones programadas usando el enfoque continuo de Cafaro y Cerdá (2004, 2008), mientras que en la parte inferior se esquematiza el mismo plan pero a nivel más detallado que permite dar cumplimiento a las metas del plan anterior.

Respecto al plan con menor nivel de detalle (ver parte superior de la Figura II.1), se muestra con una flecha horizontal en el origen del poliducto la inyección de 400 unidades de producto P2, y con flechas verticales ubicadas en los depósitos, las entregas programadas para cada destino. Como puede apreciarse, al inyectar las 400 unidades de P2 entre la hora 0.00 y la hora 8.00, se prevé la entrega de 100 y 50 unidades de productos P1 y P3 hacia el depósito D1; 50 unidades de P1 y 50 de P3 para el destino D2 y 100 unidades de P2 y 50 de P1 al depósito D3, respectivamente. Más abajo, se ilustra el mismo programa pero detallando cómo se realizarán las entregas a terminales para dar cumplimiento a las metas del plan anterior. En tal sentido, se definen dos operaciones de corte para entregar los productos requeridos por D1, igual cantidad de cortes para abastecer la

demanda de D2, y finalmente son necesarias tres operaciones para satisfacer los requerimientos de D3.

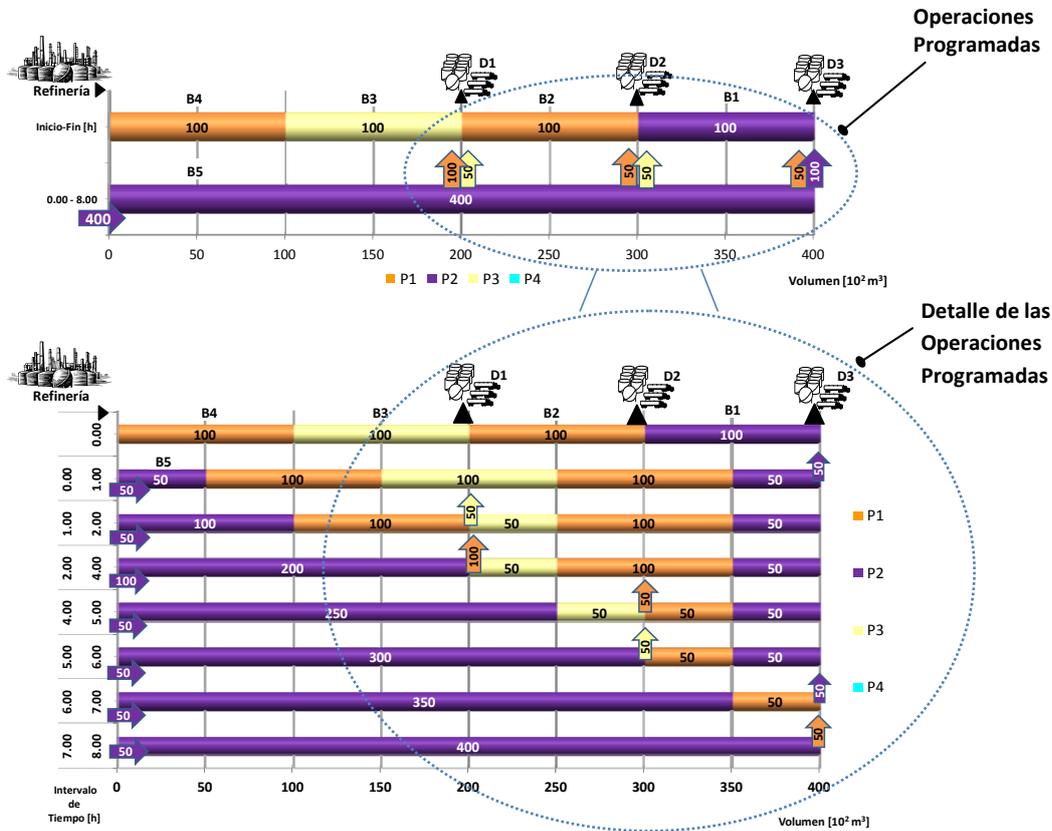


Figura II.1. Representación de las soluciones halladas con diferente nivel de detalle

Por razones de viabilidad práctica o de índole económica durante la inserción de un nuevo lote, los controladores de poliductos pueden detener la línea para proceder a la descarga de un producto en una determinada terminal distinta a la que esté activa en ese momento. Esto se logra cerrando las válvulas de acceso al tanque que que esté recibiendo producto y abriendo las válvulas de ingreso a la otra terminal. Más adelante, la operación de entrega a la primera de esas terminales puede reanudarse hasta que se cumplimente la cantidad demandada o se conmute la entrega

a otra terminal. Este tipo de interrupciones en la atención de los depósitos se denomina operación de "corte". Las operaciones de corte son operaciones de mayor nivel de detalle y tienen asociadas terminales de entregas, un flujo de combustible en movimiento en determinados segmentos del poliducto y cambios en los estados de los dispositivos de impulsión: cierre/apertura de válvulas, encendido/apagado de bombas. Si la terminal receptora varía de una operación a otra, los tramos de tubería en movimiento pueden reducirse o bien ampliarse y los dispositivos de impulsión pasar de estar activos a inactivos o viceversa.

II.3. CRITERIOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE LA SECUENCIA DE LAS OPERACIONES DE CORTE

Tal como lo exponen los autores Hane y Ratliff (1995) el consumo de energía de los poliductos y los costos de mantenimiento de bombas están mayormente determinados por el número de reactivaciones del flujo de líquido en los segmentos inactivos. Ciertamente, el costo en el que se incurre no es causado por las detenciones del flujo sino por la reactivación del movimiento del fluido en secciones del poliducto. La Figura II.2 muestra un típico poliducto multi-producto con una única fuente en el origen y tres terminales de distribución: $D1$, $D2$, y $D3$.

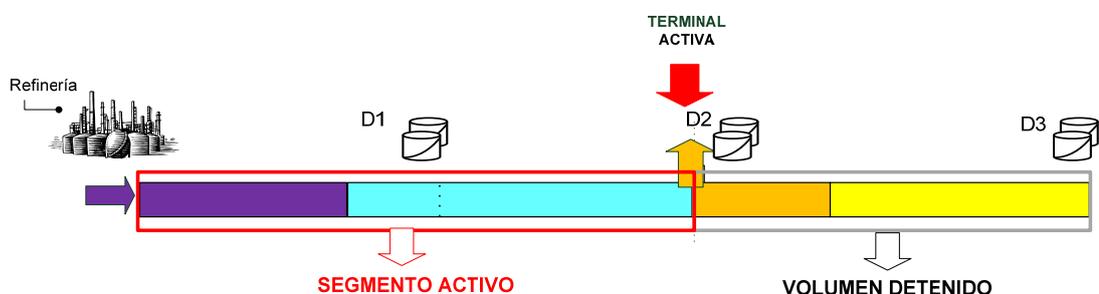


Figura II.2. Segmentos activos y detenidos mientras se inyecta un nuevo lote

Cuando el depósito $D2$ recibe combustible mientras se inyecta un nuevo lote en el poliducto, el flujo se ve ralentizado o detenido por completo aguas abajo de la terminal $D2$. En este último caso, los segmentos activos con líquido en movimiento son los que conectan la estación de entrada con la terminal $D2$, mientras que la sección $D2-D3$ permanece inactiva. Si la siguiente entrega se direcciona hacia el depósito $D3$, (aguas abajo de $D2$) el flujo en el segmento que conecta los depósitos $D2$ y $D3$ debe reactivarse. La detención de los segmentos de un poliducto resulta costosa cuando se debe dar nuevo impulso al volumen de flujo detenido. Los costos de bombeo asociados, usualmente llamado costos de reactivación del flujo, crecen con el volumen de producto puesto en movimiento. En caso que la nueva entrega de producto se localice aguas arriba de la terminal anterior, más precisamente en el depósito $D1$ (el más cercano al origen), el flujo en los segmentos que conectan $D1$ y $D3$ se detiene y no hay costos de activación. En efecto, la energía extra consumida no está vinculada a las paradas de línea, sino a las reactivaciones de flujos. Por ende, sólo las entregas aguas abajo del depósito recientemente abastecido son importantes en la etapa de programación detallada, porque las derivaciones aguas arriba nunca causan reactivaciones de flujos (Hane y Ratliff, 1995). En consecuencia, la decisión acerca de dónde remover producto desde la línea es un problema importante. Un criterio práctico generalmente aplicado por los operadores de poliductos para evaluar el "schedule", es contabilizar el número de reanudaciones de flujos y el volumen total reactivado para realizar entregas aguas abajo. Dicho valor corresponde al volumen de la sección de la tubería donde el movimiento de fluido ha de ser restaurado. En consecuencia, el objetivo buscado consiste en minimizar el volumen

total reactivado a lo largo del horizonte, para reducir tanto el consumo de energía como los costos de mantenimiento de las bombas.

II.3.1. Volúmenes de flujos activados y detenidos, y la ventaja de las operaciones con múltiples entregas a terminales por corrida de bombeo

En el plan operativo con mayor nivel de detalle la decisión acerca del lugar desde donde se derivará producto en la próxima operación reviste una alta importancia económica. El costo de la operación está principalmente relacionado con la cantidad de energía requerida para movilizar el volumen de producto contenido en los segmentos que se encontraban inmovilizados. Consecuentemente, uno de los puntos más importantes a tener en cuenta en el desarrollo de las herramientas de soporte para la toma de decisiones a mayor nivel de detalle, es la capacidad de detectar los segmentos activos y detenidos en cada corrida de inyección.

Suponiendo que el depósito D estuvo activo durante la corrida previa, en la siguiente operación solamente las derivaciones ubicadas aguas abajo del depósito D serán importantes desde el punto de vista del costo de energía ya que las entregas a los depósitos localizados entre el origen del poliducto y la terminal D no producen reactivaciones de flujo. El costo de la energía para activar los flujos detenidos crece con el volumen de productos refinados que se pone en movimiento (Hane y Ratliff, 1995). Sea para reiniciar o detener el flujo, las bombas deberán encenderse o apagarse y los costos de mantenimiento crecen con el número de activaciones y detenciones de flujo en los segmentos del poliducto. Más aún, el tamaño de la interfase entre dos lotes adyacentes tiende a crecer mientras la tubería permanece inactiva. Por el contrario, el flujo turbulento retarda significativamente el mezclado (Rejowski y Pinto, 2004).

II.3.2. Política de entregas múltiples por operación a nivel de planificación detallada

En los últimos diez años, se ha puesto especial atención en el problema de planificación de operaciones de poliductos. La mayoría de los problemas abordados considera la distribución de productos desde una única estación de inyección hacia múltiples depósitos, a través de una línea simple. La mayoría de las contribuciones publicadas en relación a la programación de poliductos asumen que el flujo de cada ejecución se moviliza entre el origen y el lugar de recepción, considerando que no existe flujo finito más adelante de la terminal receptora. Pero, los poliductos actuales no operan de ese modo. En efecto, los operadores de poliducto son capaces de disminuir el caudal del flujo desviando una cantidad específica de producto desde la línea hacia algún depósito intermedio. La corriente se divide en dos, movilizándose normalmente hasta llegar a la terminal abastecida y a partir de allí el flujo restante se traslada a una velocidad inferior hacia los depósitos más alejados. De este modo, en la práctica pueden considerarse operaciones de corte múltiples involucrando derivaciones de productos a terminales en forma simultánea. Realizando este tipo de operaciones, las entregas de productos se llevan a cabo de manera más estable, a velocidades de flujo más reducidas en las terminales más alejadas, logrando disminuir notablemente el volumen total activado y detenido. Bajo dichas condiciones, el flujo en los distintos segmentos del poliducto casi no se detiene a lo largo de todo el horizonte. El problema real se complica aún más debido a la necesidad de mantener el flujo dentro de un rango diferente en cada segmento de la tubería. Esto puede lograrse eligiendo apropiadamente el tamaño y el lugar de las entregas en cada corrida.

A lo largo del desarrollo de la presente tesis se estudiará detenidamente el problema de programación, con un mayor nivel de detalle, en poliductos unidireccionales con diferentes configuraciones (1 a N: "única fuente y múltiples terminales de destino"; M a N: "múltiples fuentes y múltiples terminales de destino") considerando entregas simples y simultáneas.

II.4 ENFOQUE JERÁRQUICO DE RESOLUCIÓN

Dado que la resolución del problema de programación a corto plazo de las operaciones de transporte de combustibles por poliductos es una tarea sumamente compleja, se propone usar un esquema jerárquico que divide la toma de decisiones en dos etapas o niveles:

(a) En el **nivel superior** se busca generar el plan "master" o plan agregado; es decir, definir la secuencia óptima de corridas de bombeo (programa de inyecciones).

En esta primera etapa o nivel superior (a), el plan agregado resultante determina: (i) la secuencia de lotes o "batches" a inyectar, (ii) el tipo de producto y tamaño de cada lote, (iii) el caudal de bombeo de cada inyección, así como (iv) la distribución de lotes en tránsito hacia los depósitos, indicando el conjunto de entregas de productos a realizar desde el poliducto a terminales durante cada corrida. Dicho de otro modo, el plan agregado tiene como objetivo definir las terminales de destino, la cantidad a entregar y el tipo de producto, así como el intervalo de tiempo asociado a cada inyección de productos en la tubería.

Este plan "master" se puede obtener resolviendo las formulaciones matemáticas propuestas por los autores D.C. Cafaro y J. Cerdá para poliductos con una única fuente (en sus publicaciones de 2004, 2008) y para poliductos con múltiples estaciones de ingreso en su trabajo del año

2009. La solución obtenida debe ser eficiente en términos de satisfacción de demanda, costos de bombeo y costos de inventarios, al tiempo que debe tenerse en cuenta la disponibilidad de productos según el plan de producción de las refinerías.

Los desarrollos más significativos de los mencionados autores (Cafaro y Cerdá) disponibles en la bibliografía para obtener el "schedule" o programa agregado consisten en formulaciones matemáticas de tiempo continuo que contemplan las restricciones operativas más importantes en la planificación de estos sistemas de transporte. Dichas contribuciones muestran una gran robustez a la hora de resolver diversos problemas de planeación agregada que involucran diferentes configuraciones de poliductos y horizontes de planeación de hasta un mes de duración.

(b) En el **nivel inferior**, se desagrega el plan "master" para optimizar la secuencia de las operaciones de entregas durante la inyección de un nuevo lote (programación detallada de las operaciones de entregas) a realizar por el operador hora tras hora para llevar adelante el plan agregado obtenido en la etapa anterior. En esta etapa se busca generar un programa de operaciones de entrega con el nivel de detalle requerido por el operador del poliducto para efectuar las derivaciones prescriptas a nivel agregado. Dicha información incluye: (i) la secuencia de lotes a entregar a cada depósito, (ii) el intervalo de tiempo durante el cual se debe realizar cada entrega, (iii) el depósito a abastecer y (iv) el tipo de producto y volumen a despachar.

La Figura II.3 muestra un resumen de la información requerida y los datos de salida generados en cada nivel de planeación.

- Demanda de producto en cada depósito y fechas de entregas requeridas
- Programa de producción de la refinería (intervalos de tiempo de corrida y tasa de producción)
- Inventario inicial en los tanques de refinería y depósitos
- Secuencia y volumen de lotes dentro del poliducto

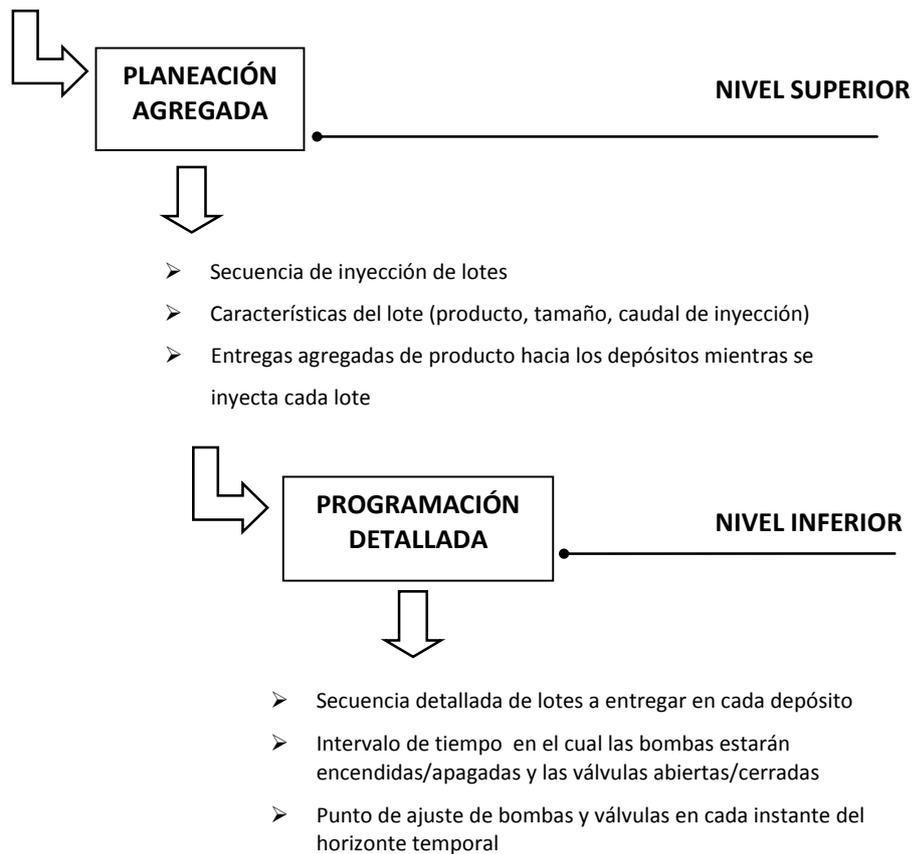


Figura II.3. Estrategia de solución jerárquica propuesta para el problema de programación de poliductos

El gran desafío de esta tesis consiste en resolver el problema de programación detallada de las operaciones de inyección y entrega a ser ejecutadas por los operadores de poliductos. Se propone entonces, desagregar plan "master" tomando toda la información brindada por la solución del problema de planeación agregada y utilizarla como dato de entrada para obtener el programa de operaciones detallada. En otras palabras, luego de generar el plan agregado de inyecciones y entregas, es

necesario programar con un nivel de detalle más refinado la ejecución de las operaciones que dan cumplimiento a las metas establecidas en el nivel superior.

A lo largo de la tesis se propone abordar el problema de programación planteado en el nivel inferior, con el objetivo de establecer (i) la secuencia detallada de operaciones de "corte" que define las entregas de lotes a los depósitos, prescriptas en el plan agregado, así como (ii) los tiempos de inicio y finalización de cada operación de entrega. En esta etapa inferior, se debe decidir no sólo el orden de ejecución de las entregas durante cada inyección, sino también el número de "cortes" a realizar hasta completar las entregas pactadas.

II.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

De aquí en adelante la tesis se encuentra organizada de la siguiente manera: en el **Capítulo III** se propone abordar la resolución del problema de programación detallada de las operaciones de inyección y descarga de productos en poliductos con una única fuente de inyección y múltiples terminales receptoras. En este capítulo se presenta un método heurístico, basado en un modelo de simulación de eventos discretos. Los principales trabajos relacionados con este capítulo se encuentran publicados por los autores *Cafaro, V. G.; Cafaro, D. C.; Méndez C. A. y Cerdá J.* en un congreso de importancia en el área de simulación: *Proceedings of Winter Simulation Conference (2010)*; como capítulo de libro en *Computer Aided Chemical Engineering (2011)*; y como artículo en la revista *Oil and Gas Journal (2011)*.

En el **Capítulo IV** se propone una metodología rigurosa alternativa basada en un modelo matemático de programación lineal mixta entera (MILP) para establecer el mejor plan detallado de entregas para poliductos con una

única fuente de inyección y múltiples terminales de destino que pueden abastecerse mediante entregas simples; es decir, se atiende una única terminal por vez durante cada operación de corte. El objetivo de la formulación propuesta consiste en obtener el programa detallado de operaciones minimizando los costos operativos. Material relacionado con este problema puede hallarse en el artículo publicado por los autores *Cafaro, V. G.; Cafaro, D. C.; Méndez C. A. y Cerdá J.* en la revista *Industrial and Engineering Chemistry Research (2011)*.

En el **Capítulo V** se extiende la formulación MILP del capítulo anterior para resolver el mismo problema de programación de las operaciones de inyección y entrega en poliductos con una única fuente y múltiples destinos, pero considerando que pueden realizarse entregas simultáneas mientras se realiza una operación de inyección. El objetivo es obtener el programa detallado de operaciones que cumpla el plan agregado prescrito, a un mínimo costo operativo total. Los resultados de los problemas abordados en este capítulo se encuentran publicados por los autores *Cafaro, V. G.; Cafaro, D. C.; Méndez C. A. y Cerdá J.* en la revista *Industrial and Engineering Chemistry Research (2012)*.

En el **Capítulo VI** se pretende abordar el problema de programación detallada de poliductos en una configuración más compleja de redes de poliductos con múltiples fuentes. Para ello se propone una formulación rigurosa de tipo continua a través de la cual se podrá obtener el programa óptimo considerando la ejecución de inyecciones en paralelo desde diferentes fuentes de entrada y entregas simultáneas a varios depósitos. Al igual que en los otros capítulos el objetivo es minimizar los costos operativos generados por el uso de bombas impulsoras para poner en movimiento el volumen contenido.

Finalmente, el **Capítulo VII**, resume las contribuciones más importantes del trabajo de tesis así como un listado de trabajos pendientes que se pretenden abordar a futuro.

Capítulo III

PROGRAMACIÓN DETALLADA DE LAS OPERACIONES DE INYECCIÓN Y DESCARGA DE PRODUCTOS EN POLIDUCTOS

Procedimientos Heurísticos Basados en Modelos de Simulación de Eventos Discretos

III.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo presenta un método heurístico, basado en un modelo de simulación de eventos discretos, para la programación detallada de las operaciones en poliductos con una única fuente y múltiples terminales de entrega. La gestión de poliductos representa una tarea crítica en el funcionamiento diario de la cadena de suministro del petróleo. Por ello es fundamental contar con herramientas computacionales eficientes para llevar a cabo esa programación de manera confiable y económica. El transporte de combustibles por tuberías se puede modelar como un sistema de colas de espera en múltiples servidores situados en el extremo posterior de cada segmento del poliducto, que realizan sus tareas de manera sincronizada. En cada etapa, ellos deciden sobre si derivar

combustible a la terminal correspondiente o transferirlo al próximo tramo. Una decisión clave del problema es elegir la terminal receptora del combustible supuesto que un solo depósito puede recibir producto en cada intervalo de tiempo. A tal fin se incorporan al modelo de simulación diversas reglas de priorización, pudiendo el operador escoger una de ellas para seleccionar el depósito que será abastecido. Según la regla heurística seleccionada, el modelo de simulación decidirá qué servidor debe enviar el elemento de producto en espera a la terminal asociada. Los servidores ubicados "aguas arriba" del servidor activo (es decir, los servidores que se encuentran entre el origen del poliducto y el servidor seleccionado) transferirán el elemento de producto situado primero en la cola de espera al siguiente segmento del poliducto, mientras que los otros servidores permanecerán inactivos. Cada regla de priorización elegida puede generar un diferente programa detallado de operaciones, cuya eficiencia podrá evaluarse mediante el uso de diversos criterios. En combinación con herramientas de optimización que proporcionan el plan agregado de inyecciones y entregas de lotes de combustible, la técnica de simulación propuesta permite gestionar fácilmente la operación real de poliductos con una única fuente de inyección y múltiples terminales de destino, mediante un esfuerzo computacional relativamente bajo.

El principal objetivo del desarrollo del modelo de simulación que se describe en este capítulo consiste en (i) validar el programa agregado provisto por el módulo de optimización que corresponde a una etapa de planificación previa, (ii) generando el programa detallado de las operaciones que permita implementar el conjunto de entregas a terminales por inyección, prescripta en el plan agregado. El modelo se desarrolla utilizando la plataforma de simulación Arena® desarrollada por la compañía

Rockwell Software (Kelton y colab., 2007). La interfaz animada permite visualizar en forma dinámica la evolución del estado del poliducto, convirtiéndose así en una valiosa herramienta de análisis. Basándose en un plan agregado de inyecciones de lotes disponible como dato del problema el modelo permite evaluar, usando distintos criterios, los diferentes programas detallados de entregas obtenidos con las reglas de priorización propuestas. El modelo de simulación utiliza variables continuas para monitorear los niveles de stocks en tanques de almacenamiento, tanto en la refinería como en las terminales de distribución. De la misma manera, permite evaluar la eficiencia en la atención de la demanda de cada uno de los centros de distribución. Esta novedosa formulación es capaz de explotar características propias de todo modelo de simulación, haciendo posible el análisis del tipo: "¿qué pasaría si?", para analizar alternativas de operación y diseño del poliducto. También puede evaluarse la robustez de las agendas de inyección y entrega ante pequeños cambios en los datos del problema, y estudiar el comportamiento del sistema frente a eventos imprevistos.

III.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Con el objetivo de desarrollar una representación realista del problema, se consideran las siguientes hipótesis de trabajo:

- (a) El sistema estudiado consiste en un poliducto unidireccional, que conecta una única refinería con múltiples terminales de destino.
- (b) El poliducto está siempre lleno de combustibles líquidos y opera en modo fungible; es decir, un mismo lote puede tener varios destinatarios.
- (c) Los lotes de productos son inyectados en el origen del poliducto uno detrás del otro, sin barreras de separación física.

- (d) El volumen de la interfaz o pérdida por contaminación entre un par de lotes consecutivos de diferentes productos es una constante conocida.
- (e) Debido a la incompresibilidad de los líquidos, cada vez que un elemento de lote de producto es inyectado en el origen, un y sólo un elemento de un único producto de igual volumen se transfiere simultáneamente desde la línea a una única terminal.
- (f) La inyección de cada lote de producto se lleva a cabo a una velocidad fija conocida.
- (g) Los centros de distribución contienen tanques de almacenamiento con stocks iniciales conocidos de determinados productos. Además, la capacidad máxima de cada tanque es un dato del problema.
- (h) A lo sumo, una terminal está conectada a la tubería en cualquier intervalo de tiempo, y el tiempo requerido para el cambio del tanque receptor es insignificante.
- (i) El plan agregado de inyecciones y entregas de productos refinados es un dato del modelo.
- (j) Los tiempos de inicio y finalización de cada corrida agregada de bombeo así como los caudales de los productos a inyectar complementan la información de entrada del modelo de simulación de eventos discretos.
- (k) Las demandas de los clientes son datos determinísticos dados sobre una base horaria.

III.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a las hipótesis previamente enunciadas y sobre la base de los siguientes datos del problema:

- ✓ la configuración del sistema de distribución, el número de depósitos, la distancia desde el origen a cada uno de ellos, y el volumen de cada sección de la tubería;
- ✓ la secuencia de lotes en tránsito a lo largo del ducto a tiempo $t=0$, así como su volumen y posición al inicio del horizonte de planeación;
- ✓ los niveles iniciales en los tanques de las estaciones de inyección y de las terminales de distribución;
- ✓ los caudales máximos y mínimos de bombeo permitidos;
- ✓ el plan agregado de corridas de inyección de lotes en la línea (secuencia de lotes a inyectar, tamaños, producto contenido en cada lote y tiempos de inicio y finalización de cada corrida); y
- ✓ el conjunto de despachos de productos a ejecutar desde lotes en tránsito a terminales durante cada inyección agregada (cantidad, producto, lote fuente, terminal de destino y fecha de entrega);

se desea generar la programación detallada de operaciones que incluye:

- La secuencia de porciones de lotes a bombear dentro de la tubería para implementar cada inyección agregada.
- El tamaño de cada inyección detallada y los tiempos de inicio y finalización de las mismas.
- La cantidad y tipo de producto a derivar desde la línea al tanque de almacenamiento de una determinada terminal, durante cada inyección detallada.

- El intervalo de tiempo durante el cual cada porción de un lote se descarga en el tanque de la terminal seleccionada.
- La gestión de inventarios de productos en las terminales de entrega, considerando los lotes de productos descargados y los despachos a los clientes sobre una base horaria.

III.4. OBJETIVO DE ESTE CAPÍTULO

El objetivo consiste en desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos para generar el programa detallado de entregas a través de la definición de la secuencia de las operaciones de apertura/cierre de válvulas de acceso a tanques de terminales y de encendido/apagado de unidades de bombeo del poliducto, que permita cumplir con el plan maestro de inyección respetando las restricciones del problema.

Cada inyección de un lote de producto en el plan agregado es convertido en una secuencia de inyecciones de porciones de ese lote en la programación detallada. Durante cada inyección detallada, se produce la entrega de un producto desde un único lote a una única terminal receptora buscando cumplimentar el plan agregado de entregas.

El desempeño del modelo de simulación propuesto se mide en función de los valores que toman las variables de respuesta. A ese fin, se consideran las siguientes variables de salida o respuesta:

- (i) el número de operaciones detalladas requeridas para dar cumplimiento al plan agregado,
- (ii) el volumen total de fluido cuyo flujo es reactivado en diferentes segmentos del poliducto a lo largo del horizonte de tiempo, y
- (iii) el número de activaciones de cada segmento del poliducto.

III.5. ESTRUCTURA DEL MODELO DE SIMULACIÓN PROPUESTO

El sistema de distribución de combustibles a través de poliductos está conformado principalmente por estaciones de inyección, terminales o depósitos de entrega, y segmentos del poliducto. A continuación se describen cada uno de dichos componentes.

El ciclo de operación del sistema comienza con el arribo de producto a la estación de inyección. El material se almacena temporariamente en los tanques de dicha estación hasta que llega una orden de inyección. Cada orden de inyección establece el tipo de producto a ser bombeado, la cantidad y la tasa de inyección. Como consecuencia, cada orden crea un nuevo "batch" a inyectar en el origen de la tubería, a través de la transferencia de material desde los tanques de almacenamiento de la estación de entrada. La secuencia de órdenes de inyección representa el plan maestro de inyección de lotes o plan agregado. Una vez dentro de la línea, el material avanza empujado por el bombeo de nuevos lotes desde la estación de inyección. Así, en un determinado momento un tramo del poliducto puede contener lotes de diferentes productos.

Las estaciones de inyección y las terminales se encuentran conectadas por tramos ó segmentos del ducto. Cada tramo se representa como un recurso que permite el traslado de producto desde un punto a otro. La capacidad de los recursos queda entonces determinada por la capacidad volumétrica de los tramos.

Los requerimientos de productos de cada terminal en un dado período de tiempo, están asociados a las órdenes de entrega de productos a terminales desde los lotes en tránsito prescriptas en el plan agregado. Por lo tanto cada orden específica de entrega incluye:

- ✓ el tipo de producto a entregar,

- ✓ la cantidad requerida a suministrar y el lote fuente,
- ✓ el centro de distribución de destino, y
- ✓ la ventana o intervalo de tiempo durante el cual dicha entrega debe ser cumplimentada, de acuerdo al plan maestro.

Cada vez que un producto alcanza la posición de alguna terminal que lo requiere, se analiza si se procede a desviar producto desde la tubería hacia los tanques de esa terminal demandante. Es importante destacar que por hipótesis se permite una única entrega por cada inyección detallada u operación. El volumen contenido entre el origen del poliducto y la terminal que está recibiendo material avanza. Esta porción de volumen en movimiento corresponde a los llamados "segmentos activos". En cambio, el fluido residente en segmentos ubicados "aguas abajo" de la terminal receptora permanece estático. En la Figura III.1 se identifica la terminal activa (D2) y los segmentos activos (Ref-D1 y D1-D2, que conectan el origen del poliducto con la terminal activa) así como el segmento detenido (D2-D3).

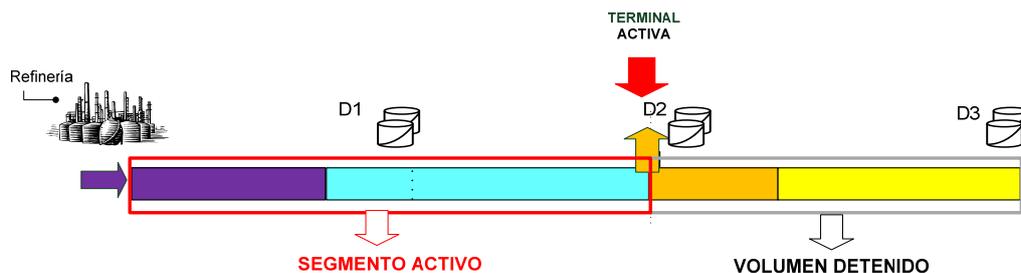


Figura III.1. Terminal activa y segmentos activos y estáticos

El material derivado desde el poliducto a una terminal es almacenado en tanques hasta el arribo de una orden de retiro. Las órdenes de retiro representan despachos al mercado ante pedidos de los clientes a ese centro de distribución.

III.6. COMPONENTES PRINCIPALES DEL MODELO DE SIMULACIÓN

La estructura del modelo de simulación comprende tres grandes bloques, cada uno de los cuales representa un componente principal del sistema en estudio: la estación de inyección, las terminales de destino, y los segmentos del poliducto. Por otra parte existen otros elementos de gran importancia en el proceso de simulación, como son las "entidades" y los recursos. Cada entidad representa una unidad de volumen de un lote de producto a inyectar o residente en el poliducto. El tamaño de todas las entidades es un parámetro del modelo que permanece constante a lo largo del horizonte de simulación y toma igual valor cualquiera sea el lote de producto. Por lo tanto, el volumen total de un dado lote de producto estará definido por tantas entidades como unidades de volumen contenga el lote. La Figura III.2 muestra los bloques, sus funciones y datos asociados, las entidades a inyectar o en tránsito y los servidores que determinan la forma de operar el poliducto para cumplimentar el plan agregado.

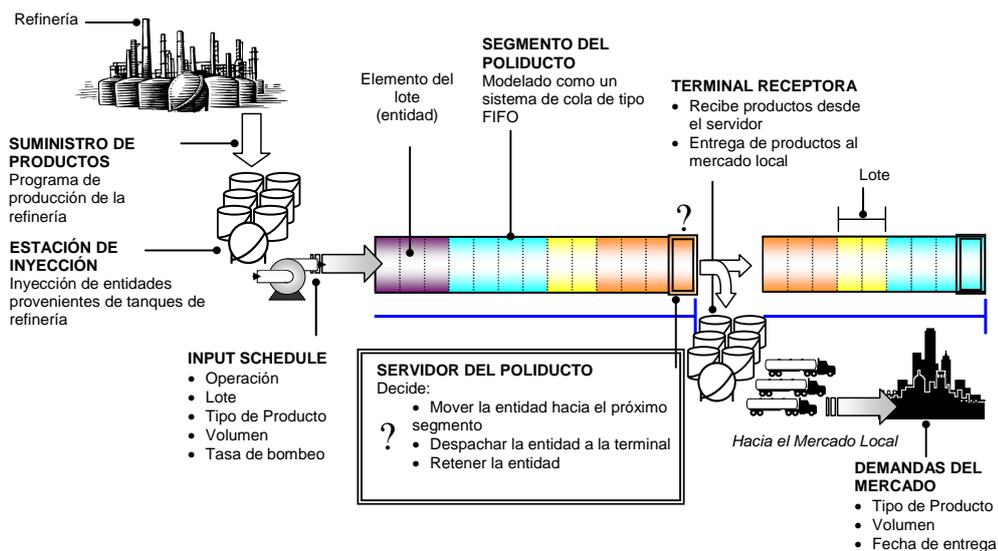


Figura III.2. Componentes principales del modelo de simulación

A continuación se describen, de manera detallada, cada uno de los componentes más importantes del sistema en estudio.

III.6.1. Estación de Inyección

La estación de inyección está ubicada al inicio del poliducto y representa el punto de origen desde donde los lotes de productos ingresan al sistema. Los lotes de productos se descargan desde los tanques de almacenamiento de dicha estación y se inyectan en la línea utilizando bombas. Estas estaciones, generalmente, reciben producto desde las refinerías aledañas, pero puede ocurrir que los combustibles procedan de otras fuentes. El sistema de simulación fuerza la detención de la actividad del poliducto cuando se agota el "stock" disponible en los tanques de almacenamiento de la estación de inyección. Las operaciones de la estación de inyección se modelan teniendo en cuenta: el "schedule" de producción de las refinerías, el plan agregado de inyecciones y la velocidad de bombeo ó inyección de cada lote de producto.

– **Schedule de producción de las refinerías:** Los arribos de nuevos productos (corridas de producción de las refinerías) a tanques de almacenamiento de la estación de inyección ocurren en eventos de tiempos predefinidos. El nivel de inventario en cada tanque de almacenamiento se modela como una variable continua permitiendo un seguimiento preciso de la evolución de los stocks de productos en la estación de inyección. Como los lotes de productos son tratados de manera discreta, sus volúmenes son expresados como un conjunto de pequeños elementos, todos del mismo tamaño, llamados entidades. Cada entidad presenta un dado volumen adoptado por el usuario. Si se define un tamaño menor para cada entidad, entonces será necesario un número mayor de elementos para representar el

volumen de un lote y así se obtendrá una representación más precisa del modelo. Por lo tanto, la elección del tamaño apropiado del volumen de las entidades es una decisión no menor.

- **"Input schedule" ó plan agregado de entradas.** Dicho programa indica la secuencia de lotes que serán inyectados en la línea y los atributos de cada lote; es decir, el tipo de producto, volumen, caudal de bombeo promedio, y tiempo de inicio y finalización de la inyección. Los atributos de un lote, salvo su volumen, son heredados por las entidades que lo componen.

- **Velocidad de bombeo.** La velocidad a la cual serán inyectados los elementos de cada lote es una decisión clave. En este caso deben considerarse las restricciones de diseño y operación. Otra cuestión crítica consiste en respetar los límites de presión, y mantener un flujo turbulento para minimizar los volúmenes de interfase. El transporte de los lotes de productos dentro de la línea, tiene asociado un costo de energía consumida promedio. El costo de bombeo está fuertemente afectado por la tasa de bombeo de los lotes. Esa es la razón por la cual el modelo de simulación tiene la posibilidad de elegir diferentes velocidades para distintos lotes o porciones de un mismo lote. Este es uno de los puntos más críticos para representar con precisión la operación real de un sistema de tuberías. Más aún, los operadores de poliductos evitan realizar inyecciones en los períodos de tiempo de alta demanda energética porque el costo unitario de la energía consumida es elevado. El sistema de simulación puede considerar fácilmente los intervalos de tiempo en los cuales el costo unitario de la energía aumenta significativamente.

III.6.2. Segmentos del poliducto

La tubería se divide en diferentes segmentos (pipes) que conectan entre sí los nodos del sistema de distribución. Se considera como nodos a las estaciones de inyección, y las terminales de distribución o bifurcaciones que pueda presentar la línea. Cada tramo se modela como un servidor con un sistema de cola de tamaño fijo de tipo FIFO (el primer elemento que entra a la cola es el primero en salir). Hay un servidor para cada segmento, que se encuentra ubicado en su extremo para permitir el movimiento de la entidad en espera ya sea al depósito ubicado al final del tramo ó al siguiente segmento. Combinando los diferentes tramos del poliducto, con distintas capacidades y caudales, es posible representar y simular el funcionamiento de diferentes estructuras de poliductos con diferentes configuraciones.

Los productos dentro de la tubería avanzan cada vez que se inyecta una entidad desde la estación de ingreso. Por hipótesis, el poliducto siempre se encuentra lleno. Por lo tanto, la entrega de un elemento de producto a una terminal de distribución se realiza en simultáneo con la inyección de una nueva entidad a la línea. Dicho de otra manera, cada vez que una nueva entidad ingresa al sistema, el servidor ubicado al final de cada tramo activo despacha la primera entidad de la cola a un tanque ó al siguiente tramo. Debido a que el sistema transporta múltiples productos, el modelo realiza el seguimiento del contenido de cada tramo actualizando las colas de los servidores en cada intervalo de tiempo. En cada intervalo, una nueva entidad puede ser inyectada en el origen del poliducto. Cada servidor puede realizar las siguientes acciones con la primera entidad esperando en cola: (i) trasladarla hacia el próximo tramo, (ii) descargarla en un tanque de la terminal asociada, ó (iii) no efectuar ninguna acción, es decir retener la

entidad en la posición actual. En los dos primeros casos, el servidor estará activo, permaneciendo inactivo en el caso restante.

Al comienzo del horizonte de planeación es necesario crear el contenido inicial del poliducto. Esto puede lograrse a través del proceso de inicialización. El volumen de cada tramo del poliducto está determinado por el número de entidades que puede contener. Dicho valor permanece constante a lo largo de todo el horizonte de planeación y puede calcularse considerando el diámetro y la longitud del segmento.

III.6.3. Terminales de inyección y distribución

Las terminales o depósitos, están representadas por tanques de almacenamiento de productos que serán inyectados en el poliducto ó enviados a los clientes. Los tanques tienen un nivel máximo que no puede ser excedido, y un nivel mínimo que debe mantenerse. Tal como fuera mencionado, se utilizan variables continuas para realizar el seguimiento de los niveles de inventario en los tanques de refinerías ó terminales de distribución.

El modelo de simulación genera de manera automática el programa detallado de entregas ("output schedule") en base al plan agregado de entregas a cada terminal y la regla de priorización de terminales que se escoja. Esta regla sirve para seleccionar la próxima terminal activa de una lista de terminales candidatas. Las entregas a cumplimentar son obtenidas de la matriz de entregas agregadas lote /terminal ($Q_k^o(i,j)$) provista por el módulo de optimización que implementa la etapa de planeación agregada (ver Figura III.3).

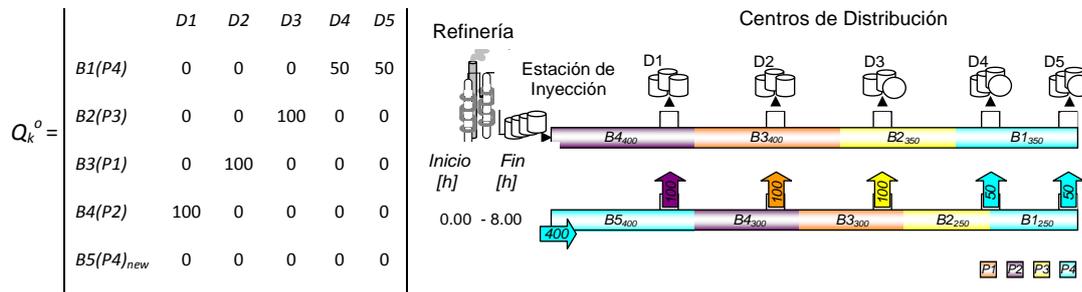


Figura III.3. Información resultante del proceso la planeación agregada:
Matriz de entregas agregadas lote/terminal

Por otra parte, los lotes de productos se despachan desde los tanques terminales de distribución hacia el mercado de consumo, generalmente a través de camiones cisterna. La atención de la demanda de cada terminal, debe realizarse de manera eficiente en términos de costos de activaciones de segmentos (encendido y apagado de bombas) y de mantenimiento de bombas impulsoras. La optimización de la secuencia de selección de terminales activas a atender a lo largo del horizonte de simulación es la clave para obtener un "schedule" detallado de las operaciones a realizar para cumplimentar el plan agregado a un menor costo operativo. Seguidamente se describen tres reglas heurísticas propuestas para escoger la terminal activa cada vez que una unidad de volumen se inyecta en la línea.

III.7. REGLAS HEURÍSTICAS PARA SELECCIONAR LA TERMINAL DE DESTINO

Los servidores realizan las operaciones de manera sincronizada. Cuando una entidad es inyectada en la línea, hay un número limitado de servidores disponibles para despachar otra entidad desde algún "batch" en tránsito hacia la terminal relacionada. Dicho conjunto de servidores elegibles se desprende directamente de la programación agregada de entregas provista

por el modulo de optimización en la etapa de planificación anterior y de las entregas realizadas. Como resultado, cada vez que una entidad es inyectada, cada servidor puede decidir si el primer elemento de la cola es elegido o no para ser entregado a la terminal asociada. Si no lo es, la entidad puede ser enviada al siguiente segmento o permanecer inmóvil en la cola. Sin embargo, por razones operativas, sólo una terminal puede estar activa recibiendo una entidad en cada evento de entrada. Si dos o más servidores pueden ser seleccionados para despachar la entidad primera en la cola de espera a la terminal correspondiente, el modelo de simulación decidirá cuál elegir aplicando la regla de priorización adoptada. Cada vez que ocurre un evento de entrada, el modelo de simulación usará esa heurística de asignación de prioridades para elegir la terminal activa. En el caso que ninguna de las terminales elegibles sea restrictiva (ver sección III.7.1), se elige como terminal activa la de mayor prioridad.

III.7.1. Algoritmo para seleccionar la terminal activa

Cada vez que una entidad ingresa en el poliducto, se realizan los siguientes seis pasos:

Paso 1: Identificar las terminales candidatas en el evento actual k . Supongamos que se inyecta un elemento del "batch" i' en el evento k , y que la primera entidad en la cola del servidor de la terminal $j \in J_{i,i'}$ proviene del lote i . Si la entrega agregada desde el lote i a la terminal j durante la inyección del lote i' ($\bar{d}_{i,j}^{(i')}$) aún no ha sido completada hasta la ocurrencia del evento $(k-1)$, entonces el depósito j es elegible para recibir la entidad desde el lote i . Supongamos que $\bar{d}_{i,j,(k-1)}^{(i')}$ es la cantidad transferida a la terminal j hasta que finaliza el evento $(k-1)$, entonces el depósito j será candidato a ser elegido en el evento k sólo si $\bar{d}_{i,j,(k-1)}^{(i')} < \bar{d}_{i,j}^{(i')}$.

Paso 2: Identificar las terminales restrictivas al tiempo del evento k . Supongamos que la terminal $j \in J_{i,i'}$ es candidata a ser elegida para recibir una entidad desde el "batch" i , y que se está introduciendo un elemento del "batch" i' en el evento k . Debido a que se está considerando un poliducto unidireccional, toda unidad que sobrepase la terminal j ya no podrá despacharse hacia dicho destino. Si es absolutamente necesario que dicha unidad del lote i sea entregada a la terminal j para satisfacer la demanda total agregada $dd_{i,j}^{(i')}$ el programa detallado sería infactible si la terminal j no es seleccionada como terminal activa y el lote i sobrepasa la ubicación de j al cabo del evento k . Por lo tanto, la terminal j en cuestión se considera restrictiva y las terminales j' ubicadas aguas abajo (es decir, localizadas más lejos del origen que la terminal j) no deben ser elegidas como depósitos de destino. Caso contrario, la entrega agregada especificada para la terminal j no podría completarse y el plan agregado no se cumpliría. Así, sólo las terminales localizadas entre el origen y el depósito j son elegibles como terminal de destino en el evento k actual, y se selecciona, de entre ellas, la de mayor prioridad.

Para verificar la existencia de terminales restrictivas, se computa el número de entidades del "batch" i localizadas entre el origen del poliducto y la terminal j mientras se inyecta el lote i' ($N_{i,j,(k-1)}^{(i')}$) al cabo del evento $(k-1)$. Si el parámetro v representa el volumen de cada entidad entonces la terminal j es restrictiva cuando $[dd_{i,j}^{(i')} - d_{i,j,(k-1)}^{(i')}] = v * N_{i,j,(k-1)}^{(i')}$; es decir, la cantidad de producto pendiente de despacho para completar la entrega agregada $dd_{i,j}^{(i')}$ coincide exactamente con el volumen disponible para la entrega a esa terminal. La presencia de una terminal restrictiva puede obligar a desarrollar una entrega agregada desde un lote en tránsito a una terminal en dos o más sub-entregas no consecutivas.

Paso 3: Identificar la terminal más restrictiva. Si hubiera más de una terminal restrictiva al inicio del evento k , seleccione la más restrictiva de todas; es decir, el depósito restrictivo j más cercano al origen. Las terminales j' candidatas con $\sigma_{j'} > \sigma_j$ no pueden ser elegidas como depósito de entrega en el evento k .

Paso 4: Seleccionar la terminal activa. Entre las terminales candidatas localizadas entre el origen del poliducto y la terminal más restrictiva j , seleccione el depósito j^* con la mayor prioridad como la terminal de destino durante el evento k .

Paso 5: Ejecutar las operaciones de inyección y despacho. Inyecte una nueva entidad en el sistema de tuberías y simultáneamente transfiera, a la terminal elegida j^* , la entidad del "batch" i esperando ser servida en el segmento que desemboca en la terminal j . Actualice la cantidad transferida a la terminal j desde el "batch" i : $d_{i,j,k}^{(i')} = \bar{d}_{i,j,(k-1)}^{(i')} + v$.

Paso 6: Actualizar el contenido del poliducto. Mueva la primera entidad de la cola de cada servidor ubicado entre el origen del poliducto y la terminal j^* , al siguiente segmento de la tubería. Vuelva al paso 1.

III.7.2. Reglas de priorización de terminales

Se proponen tres reglas heurísticas de asignación de prioridades para elegir la terminal activa en cada evento de tiempo a fin de generar el "schedule" detallado de operaciones mediante el modelo de simulación de eventos discretos. Ellas son: (a) Priorice la terminal más cercana al origen del poliducto (*NF*: "Nearest-First"), (b) Priorice la terminal más alejada del origen (*FF*: "Farthest-First"), y (c) Priorice la terminal más cercana a la última terminal receptora (*NC*: "Nearest-to-the-Current-Terminal"). A

continuación se realiza una breve descripción de cada una de las reglas mencionadas.

(a) ***Priorice la terminal más cercana al origen (NF)***: Entre las terminales candidatas, seleccione la terminal más cercana al origen. Si dos terminales alternativas están disponibles para recibir producto desde el poliducto, se elige el depósito más cercano al origen. Esta regla garantiza que ningún "batch" sobrepase una terminal demandante, evitando el surgimiento de terminales restrictivas.

(b) ***Priorice la terminal más lejana al origen (FF)***: De acuerdo a esta regla la terminal demandante más alejada del origen del poliducto es la prioritaria. En este caso es necesario verificar la existencia de terminales restrictivas. Si surgen varias terminales restrictivas, se elige la terminal candidata, situada sobre el tramo que une el origen del poliducto y la terminal más restrictiva, que sea prioritaria.

(c) ***Priorice la terminal más cercana a la última atendida (NC)***: Esta regla prioriza, entre los depósitos candidatos, aquél que se encuentre ubicado más cerca de la última terminal abastecida. Si sólo hubiera dos terminales candidatas ubicadas a la misma distancia del depósito previamente atendido, se elige la más cercana al origen. Obviamente, la última terminal abastecida tiene la máxima prioridad; es decir, continuar atendiendo el depósito activo es prioritario.

Se pudo verificar que priorizando la terminal más cercana a la última abastecida se obtiene una reducción importante en el volumen total activado y detenido y, por consiguiente, en el costo de bombeo y en el número de operaciones de encendido y apagado de bombas.

III.8. RESULTADOS

En el presente apartado se resuelve un caso de estudio previamente estudiado, aplicando el modelo de simulación de eventos discretos. Una vez presentado y resuelto dicho ejemplo, se puede ponderar el aporte práctico de la herramienta desarrollada analizando las soluciones halladas al aplicar las diferentes reglas heurísticas propuestas.

III.8.1. Caso de Estudio: Un problema real de la industria petrolera

El modelo de simulación propuesto se aplica a un caso de estudio real, primeramente introducido por Rejowski y Pinto (2003) y luego resuelto por Cafaro y Cerdá (2004, 2008). El problema de transporte consiste en la operación diaria de un poliducto que transporta aproximadamente el 20% de los derivados de petróleo en Brasil. La tubería tiene aproximadamente 955 km de longitud y conecta la refinería de REPLAN situada en San Pablo con cinco centros de distribución. La Figura III.4 ilustra una parte de la red de poliductos de la empresa. La parte del sistema bajo estudio (resaltado en la Figura III.4) se encuentra conformado por cinco segmentos, cuyas capacidades volumétricas están dadas en la Tabla III.1. El caso de estudio involucra la distribución de cuatro productos (gasolina, diesel, LPG, y jet-fuel).

Se desea determinar la programación detallada de entregas para el poliducto de la Figura III.4 con una única fuente y cinco terminales o centros de distribución sobre un horizonte de planeación de cuatro semanas.



Figura III.4. Red de poliductos de REPLAN

Tabla III.1. Definición de tramos y capacidades

Tramo	Capacidad volumétrica [10 ² m ³]
Refinería - Terminal D1	400
Terminal D1 - Terminal D2	250
Terminal D2 - Terminal D3	250
Terminal D3 - Terminal D4	600
Terminal D4 - Terminal D5	135

El programa agregado para este problema, que se muestra en la Figura III.5, fue determinado en una etapa previa a través de un modelo de optimización MILP dinámico que actualiza el plan semana-a-semana, publicado por Cafaro y Cerdá (2008). La primera línea de la Figura III.5 describe la configuración inicial del poliducto y las líneas siguientes ilustran la secuencia de inyecciones de lotes a nivel agregado. Los datos para el

problema de planeación agregada, así como los detalles del modelo dinámico, pueden encontrarse en Cafaro y Cerdá (2008).

En la Figura III.5, se observa una secuencia de nueve lotes a ser inyectados desde la refinería. El primero de ellos es el lote B6 y el último el B14. En la Tabla III.2 se puede ver el tamaño original de cada "batch", el producto que contiene, así como el tiempo de iniciación de la operación de inyección al poliducto.

El modelo de simulación de eventos discretos se ejecuta con un procesador Intel Core i7 (3.33 GHz) utilizando un software cuyo nombre comercial es Arena[®]14.0. El modelo de simulación consiste en un sistema de tuberías compuesto por un gran número de entidades relativamente pequeñas cuyo volumen v se fija en 100 m³. De este modo, un total de 1635 entidades son requeridas para llenar toda la tubería.

Tabla III.2. Plan agregado de entradas ("Input Schedule") para el caso de estudio

"Batch"	Producto	Volumen [10 ² m ³]	Tiempo de Inicio [h]
B6	P4	425	5.0
B7	P2	1356	55.0
B8	P4	120	168.0
B9	P1	1235	183.0
B10	P3	390	336.0
B11	P1	665	384.0
B12	P4	260	442.0
B13	P2	1963	466.0
B14	P4	290	635.0

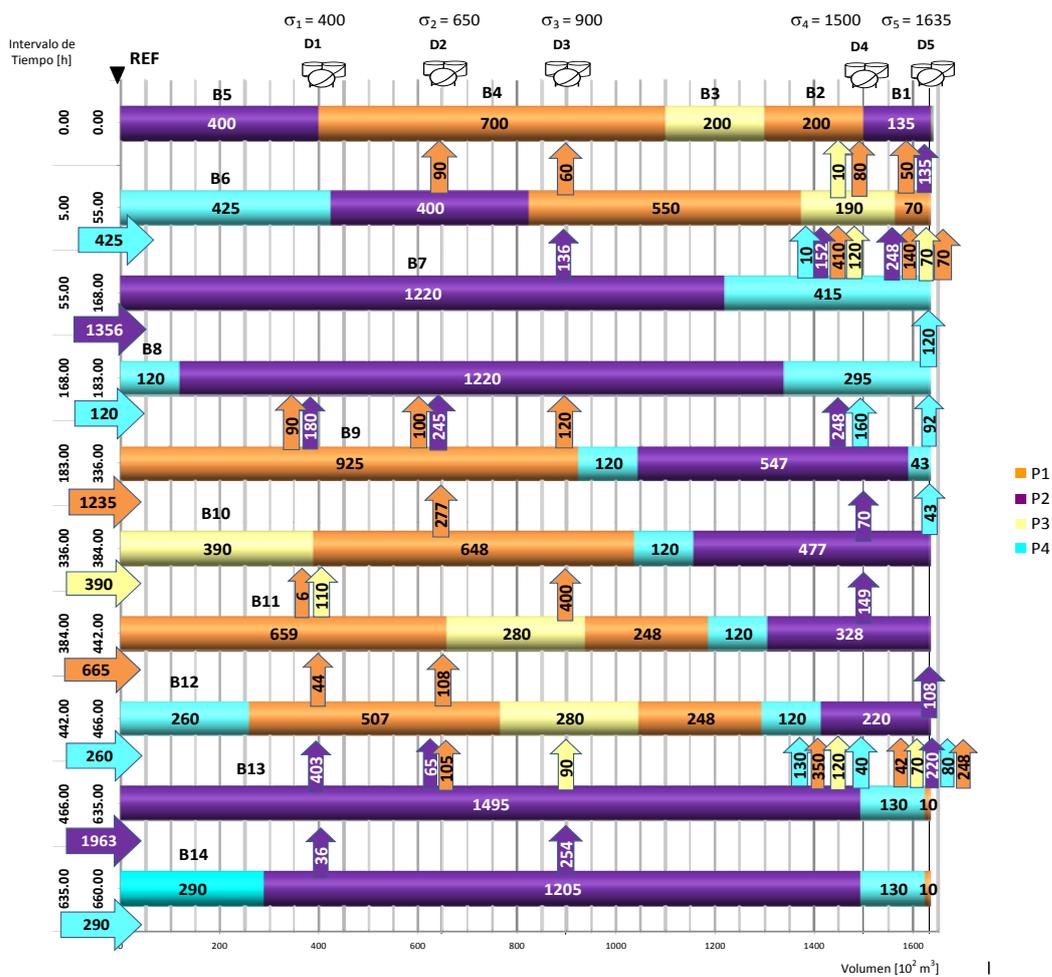


Figura III.5. Plan agregado propuesto para el caso de estudio (Cafaro y Cerdá, 2008)

III.8.2. Interfaz del modelo de simulación propuesto

La Figura III.6 muestra la interfaz del modelo de simulación propuesto para el caso de estudio, utilizando el software Arena®. La interfaz animada del simulador permite la visualización de las operaciones del poliducto, pudiéndose observar el movimiento de los lotes y la descarga de productos a los tanques de las terminales a lo largo del tiempo. En otras palabras, la evolución del estado del poliducto. El software Arena® permite el desarrollo de una representación gráfica para evaluar el modelo de simulación en tiempo real.

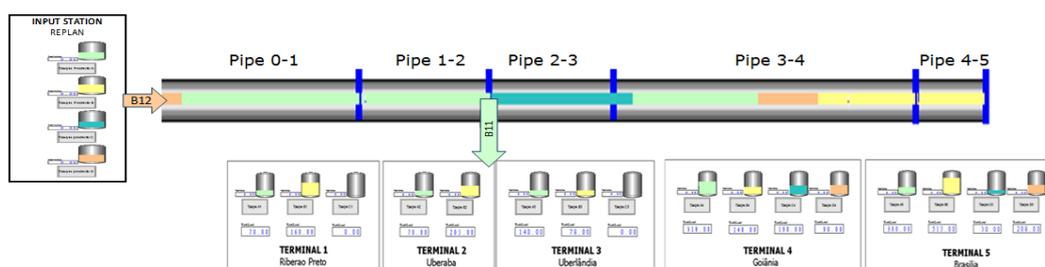


Figura III.6. Vista de la interfaz animada

Cada entidad representa una cantidad fija de volumen de un cierto producto, ubicada en un lugar específico de la tubería a un evento de tiempo dado. A través de la interfaz animada es muy sencillo realizar un seguimiento del contenido y ubicación de las entidades a lo largo del horizonte de planificación. Adicionalmente, la interfaz animada permite visualizar los niveles de inventario en los tanques de almacenamiento tanto en la estación de inyección como en las terminales. Como se muestra en la Figura III.6, las dos flechas ubicadas, una en la terminal de inyección y la otra en la terminal activa, muestran respectivamente el lote que se está inyectando (B12) y el que se está entregando (B11). Más aún, las variables globales del sistema, como ser el volumen total activado y la demanda todavía insatisfecha de cada terminal ($qk(i,j)$) pueden incluirse en la animación del sistema, permitiendo una mejor comprensión de la dinámica del sistema.

III.8.3. Aplicación de reglas heurísticas para elegir la terminal de entrega

Se propone resolver el programa detallado aplicando, de manera gradual, las diferentes reglas heurísticas antes presentadas. Primeramente se utilizará el modelo de simulación para obtener el programa detallado considerando sólo la primera semana de operación, para luego aplicarlo al horizonte de planificación mensual. Supongamos que T2 fue la última terminal activa en el horizonte previo.

La Figura III.7 muestra las secuencias de las entregas de productos a cada terminal en el tiempo, obtenidas según la regla de priorización que se aplique. En la primera línea de cada diagrama de la Figura III.7, se ilustra la inyección del lote que transcurre mientras se realizan los despachos correspondientes.

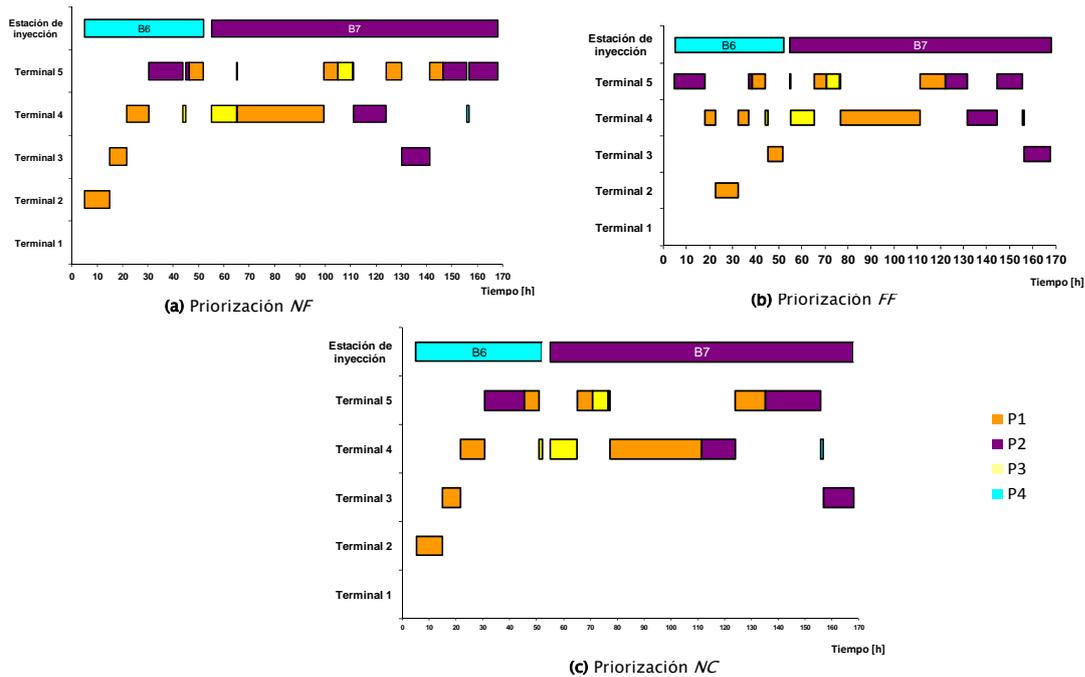


Figura III.7. Programación de entregas detalladas utilizando las reglas heurísticas: (a) NF, (b) FF, y (c) NC para la primera semana de operación

III.8.3.1. Regla de Prioridad NF: Programación detallada de operaciones para la primera semana del horizonte

La Figura III.7a representa el plan detallado de entregas, generado a través del uso de la regla heurística de priorización NF, para la primera semana del horizonte de planificación. Desde la hora $t= 5$ hasta $t= 14.95$, una porción del lote B4 se transfiere a la terminal T2 ,al inyectar la porción inicial de B6 en la estación de ingreso. En consecuencia, no hubo activación ni detención del flujo en ningún segmento del poliducto. A la hora $t= 14.95$ h, culmina la entrega planificada a T2, y el remanente del lote B4 comienza

a despacharse hacia T3. Como consecuencia, el segmento 2-3 se activa, y los otros segmentos 0-1 y 1-2 permanecen activos durante la segunda operación de corte. El volumen activado asciende a 2500 m³. A la hora $t=21.59$ h, el segmento 3-4 también se activa y la terminal T4 comienza a recibir gasolina del lote B2. Otros 60000 m³ de combustible se ponen en movimiento. Aproximadamente 9 horas más tarde ($t=30.44$ h), el segmento 4-5 se activa y T5 comienza a recibir diesel desde el lote B1. Así, el volumen activado total crece a 98000 m³. Una vez que se transfiere todo el lote B1 ($t=43.71$ h) ocurre la primera detención de los lotes en uno de los segmentos del poliducto en el programa. La terminal T4 comienza a recibir LPG desde el lote B3 y el segmento 4-5 se desactiva. El líquido contenido en dicho segmento se detiene y el volumen detenido acumulado asciende a 13500 m³. El volumen total acumulado es el resultado de sumar el volumen total detenido a lo largo del horizonte de planeación. En consecuencia, aplicando la regla de prioridad *NF*, se requieren 20 operaciones de corte durante la primera semana, siendo el volumen total activado de 239500 m³ y el volumen total detenido de 141000 m³. La diferencia entre el volumen total activado y el volumen total detenido en valor absoluto, es siempre igual al volumen de los tramos que unen la última terminal activa del horizonte previo y del horizonte actual.

III.8.3.2. Regla de Prioridad FF: Planificación de la primera semana

La figura III.7b describe el plan de entregas obtenido al aplicar la regla que prioriza la atención de la terminal más alejada del origen (*FF*). Usando dicha regla, también se necesitan 20 operaciones de corte. Sin embargo, el volumen total activado es de 311000 m³ y el volumen total detenido asciende a 286000 m³, considerablemente mayor a lo 239500 m³ y

141000 m³ obtenidos con la regla que prioriza la terminal más cercana al origen (*NF*). Dicha diferencia se reduce cuando se considera un horizonte de tiempo mensual.

III.8.3.3 Regla de prioridad NC: Planificación de la primera semana

Por su parte, la Figura III.7c muestra el programa de entregas de la primera semana logrado cuando se aplica la regla que prioriza la atención de la terminal más cercana a la previamente activa (*NC*).

En la Figura III.8 se muestra una forma alternativa de ilustrar gráficamente el programa detallado de entregas cuando se aplica la regla *NC*. En cada intervalo de tiempo se puede ver la evolución del contenido de cada segmento; la cantidad y el producto inyectado; la terminal activa junto con la cantidad y producto recibido. Así, se puede tener un nivel de detalle más preciso del "schedule" obtenido.

Se necesitan 16 operaciones de corte y el volumen activado total se reduce a 125500 m³ y el volumen detenido total a 100500 m³. Esto implica ahorros del 28.7 % y 64.9 % respecto a los resultados obtenidos con las reglas *NF* y *FF*, respectivamente. Cuando se considera el horizonte mensual de planeación, la diferencia es aún más notoria.

En la Tabla III.3 se muestra un resumen de los resultados para el ejemplo resuelto.

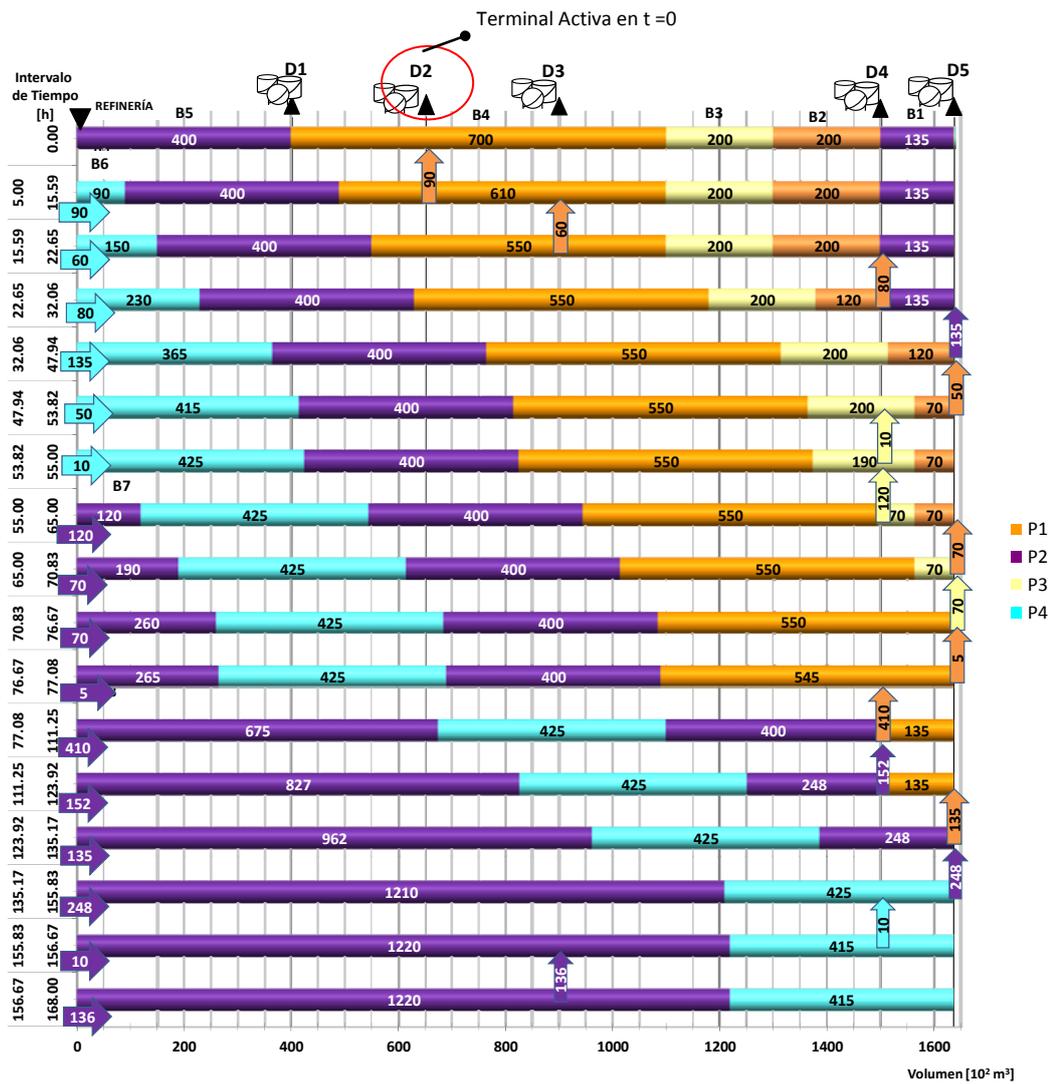


Figura III.8. Programación de entregas detalladas utilizando la regla heurística NC para la primera semana del horizonte de planeación

Tabla III.3. Resultados para los ejemplos resueltos aplicando las diferentes reglas heurísticas en el modelo de simulación

Horizonte	Regla	Operaciones $ K $	Volumen Activado [10 ² m ³]	Volumen Detenido [10 ² m ³]
Semanal	NF	20	2395	1410
	FF	20	3110	2860
	NC	16	1255	1005
Mensual	NF	65	14295	14045
	FF	63	14475	14725
	NC	55	8600	8350

III.8.3.4 Programa de entregas con horizonte mensual

En las Figura III.9a, III.9b y III.9c se muestran los planes detallados de entregas para todo el mes de planificación, aplicando las reglas de prioridad *NF*, *FF*, y *NC*, respectivamente. La primera línea de dichas figuras muestra las corridas de inyección de los lotes, desde el lote B6 al lote B14. Las otras líneas representan las entregas de productos a las terminales mientras se ejecuta la inyección correspondiente. Los tres planes de entregas obtenidos son luego evaluados en base al volumen total activado y detenido, y al número de operaciones requeridas para cumplimentar el plan agregado. Aplicando la regla que prioriza la atención de la terminal más cercana al origen (*NF*) a lo largo de todo el horizonte de planeación, el volumen total activado es de 1429500 m³, el volumen total detenido es de 1404500 m³ y se requieren 65 operaciones de corte. Por su parte, al aplicar la regla *FF*, el volumen total activado es de 1447500 m³, el volumen total detenido es de 1472500 m³, pero es necesaria la realización de 63 operaciones. Finalmente, cuando se emplea la regla que prioriza la entrega a la terminal más cercana a la previamente activa (*NC*), el volumen total activado cae a 860000 m³ y el volumen total detenido desciende a 835000 m³ y el plan de entregas se completa en tan sólo 55 operaciones (ver Tabla III.3 donde se resumen los resultados obtenidos).

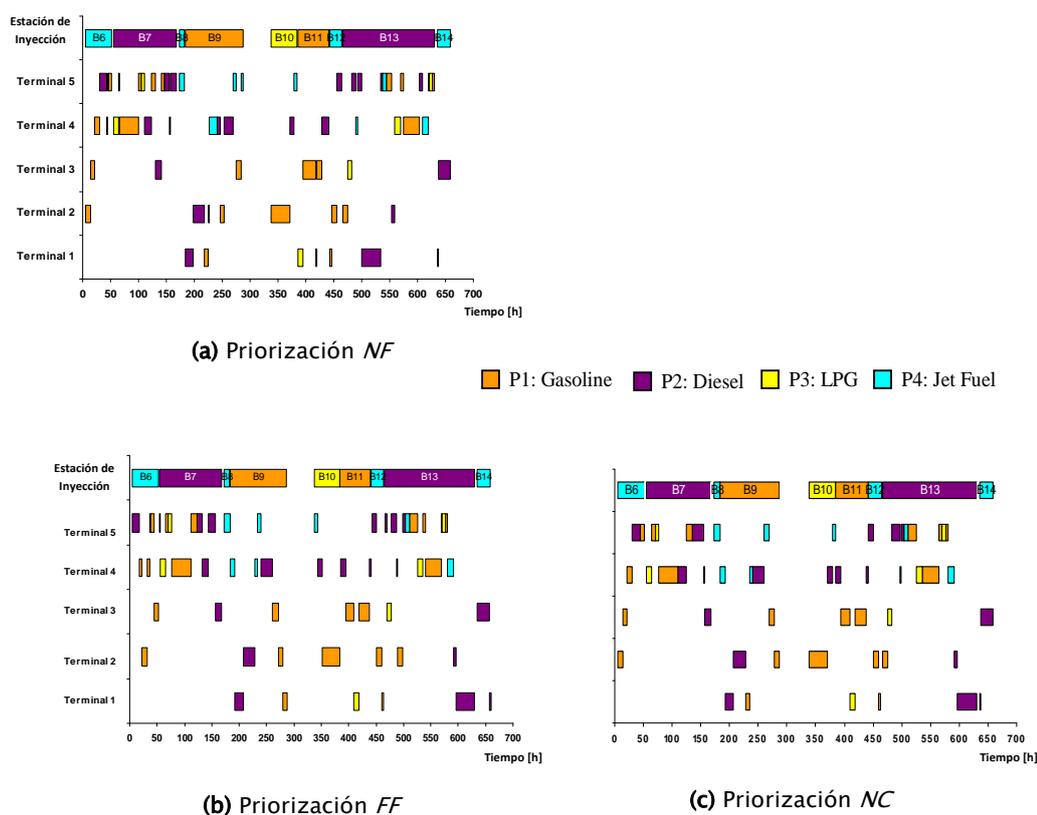


Figura III.9. Programa de entregas usando las reglas heurísticas (a) *NF*, (b) *FF*, y (c) *NC* para un horizonte mensual

III.9. CONCLUSIONES PRELIMINARES

A lo largo de este capítulo, se presentó un modelo de simulación de eventos discretos para obtener la programación detallada de operaciones en poliductos con una única fuente de inyección, ubicada en el origen del poliducto, y múltiples terminales de entrega. El novedoso enfoque propuesto apunta a validar el plan agregado provisto por técnicas de programación rigurosa. Al mismo tiempo, el modelo de simulación permite generar y testear distintos programas detallados de operaciones de inyección y descarga a terminales en menos de un minuto de uso de CPU. Los resultados muestran que la implementación de diferentes reglas de priorización para seleccionar la terminal activa durante cada inyección detallada, lleva a la obtención de soluciones significativamente diferentes,

especialmente en términos de costos. Por ejemplo, priorizando la entrega a la terminal más cercana al origen (*NA*), se puede lograr que el volumen total a activar sea razonable, pero el número de las operaciones de corte (encendido y apagado de bombas) es elevado. Por su parte, priorizar la terminal más alejada (*FA*) puede causar incrementos importantes en la cantidad y volumen de activaciones. Está claro que con dichas reglas heurísticas, rara vez se hallará el plan de entregas óptimo. Sin embargo, el desarrollo de la regla que prioriza la atención de la terminal más cercana a la previamente atendida (*NC*), genera soluciones más eficientes. Dicha regla reduce significativamente el volumen total activado, casi en un 40 % con respecto a las otras reglas, y además hay una notable reducción en el número de operaciones de corte.

El modelo de simulación propuesto permite visualizar la evolución dinámica del sistema a través del tiempo, utilizando una interfaz animada muy amigable. El enfoque puede extenderse fácilmente para permitir el uso de herramientas de optimización basadas en las salidas del modelo de simulación con el fin de mejorar el rendimiento de los programas resultantes.

Capítulo IV

PROGRAMACIÓN DETALLADA CON ENTREGAS SIMPLES

Modelado Matemático

IV.1. INTRODUCCIÓN

La metodología heurística presentada en el capítulo anterior fue diseñada para configuraciones de poliductos con una única fuente y múltiples destinos que pueden abastecerse mediante entregas simples, es decir atendiendo la demanda de un producto de sólo un depósito por vez. El método de simulación de eventos discretos cumple con el objetivo de: (i) validar el plan agregado proveniente de una primera etapa de planificación (ii) generando el programa detallado de operaciones que cumpla lo prescrito por dicho plan agregado. Esto se logró implementando un modelo de simulación de eventos discretos, a través del cual se obtiene un plan factible de entregas detalladas.

Por su parte, el presente capítulo tiene como finalidad, introducir una metodología rigurosa alternativa que permita establecer el mejor plan de entregas detalladas. Una vez implementado este plan, se podrán contrastar

los resultados obtenidos con aquellos hallados a través de la metodología heurística.

A tal efecto, se propone un modelo matemático de tipo lineal mixto entero (MILP) basado en una escala continua de tiempo para el problema de programación detallada de poliductos con una única fuente y múltiples terminales, a través del cual se puede obtener un plan eficiente de las operaciones a cumplimentar a lo largo del horizonte de planeación con entregas simples en cada corrida de inyección. Por entrega simple, se entiende la entrega de un producto a un único depósito por vez durante cada corrida. La formulación propuesta tiene como doble objetivo minimizar el volumen total de fluido cuyo flujo se debe reactivar y el número de entregas individuales requeridas a lo largo del horizonte de planeación. En tal sentido, se alcanzan ahorros significativos en lo que respecta al consumo de energía y costos de bombeo.

Dependiendo de la longitud del horizonte de planeación que se pretenda abordar, la formulación matemática puede insumir un tiempo elevado de resolución. Para afrontar dichos problemas se proponen distintas estrategias de solución para resolver el problema de programación detallada de poliductos en tiempos computacionales aceptables.

Para evaluar el desempeño de la formulación propuesta aplicando las distintas estrategias de solución planteadas, se resuelven tres instancias del mismo caso de estudio abordado en el capítulo anterior. Los resultados hallados son analizados para juzgar la calidad de las soluciones generadas en cuanto al costo y tiempo computacional requerido.

IV.2. EJEMPLO MOTIVADOR

Para introducir el problema que se pretende resolver se presenta un ejemplo que sirve de ayuda para comprender el funcionamiento del sistema. La Figura IV.1 muestra un poliducto destinado al transporte de cuatro tipos de combustibles (P1, P2, P3 y P4). El sistema se compone de una única terminal de bombeo (refinería) y tres terminales receptoras. La primera línea de la Figura IV.1 muestra la ubicación inicial de los lotes de productos al comienzo del horizonte de planeación. Se observan cuatro lotes [B1 (P2), B2 (P1), B3 (P3), B4 (P1)] conteniendo 100 [10² m³] cada uno. Entre paréntesis se indica el producto contenido en cada lote. La siguiente línea de la Figura IV.2 muestra el estado del poliducto luego de completar la inyección del lote B5 con 400 unidades de producto P2, desde la hora 0.00 hasta las 8.00 h. Dicha inyección se representa con una flecha horizontal en el origen de la segunda línea de la figura. Sobre la misma línea las flechas verticales ubicadas a la altura de los depósitos, indican las entregas programadas para satisfacer la demanda de las terminales de recepción, mientras se inyectan las 400 unidades del lote B5. Este tipo de soluciones puede obtenerse con modelos de optimización como los publicados por Cafaro y Cerdá (2004, 2008). Tal como se muestra en la segunda línea de la Figura IV.1, la solución hallada origina, no sólo el programa de inyecciones de productos, sino también el conjunto de operaciones de despacho a nivel agregado a ser ejecutadas durante cada inyección. Debido a la propiedad de incompresibilidad de los líquidos transportados en la tubería, la cantidad de combustible que ingresa al poliducto tiene que ser equivalente a la cantidad que egresa del mismo durante cada corrida. Dicho de otra manera, el volumen que se inyecta en el origen tiene que coincidir exactamente con la suma de las derivaciones a los depósitos: $400 = 100 + 50 + 50 + 50 + 50$

+ 100. No obstante, existen diferentes opciones para llevar a cabo el programa agregado de entregas. Una alternativa es priorizar la atención de la terminal más cercana al origen, entre las que están en condiciones de recibir el lote de producto prescrito por el plan agregado, como se describe en la Figura IV.2. En este sentido, el operador intentará elegir una secuencia de entregas tal que priorice el despacho de cierta cantidad de producto al depósito D1, luego a D2 y por último a D3. Con dicha sucesión de entregas se intenta restituir el flujo una única vez en cada segmento para minimizar el número de activaciones. Por cuestiones operativas este patrón de entregas no siempre puede ser implementado debido a que el lote requerido por la terminal prioritaria puede no estar disponible para la descarga. Tal es el caso de la segunda operación de entrega mostrada en la Figura IV.2 (tercera línea). Debido a que el "batch" B4 requerido por D1 (depósito más prioritario) aún no está disponible para la entrega, se prioriza la atención del depósito D2.

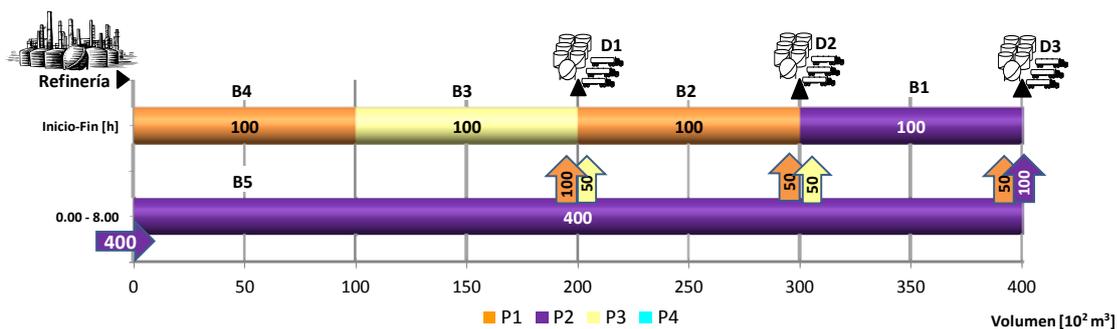


Figura IV.1. Programa agregado para el ejemplo de aplicación

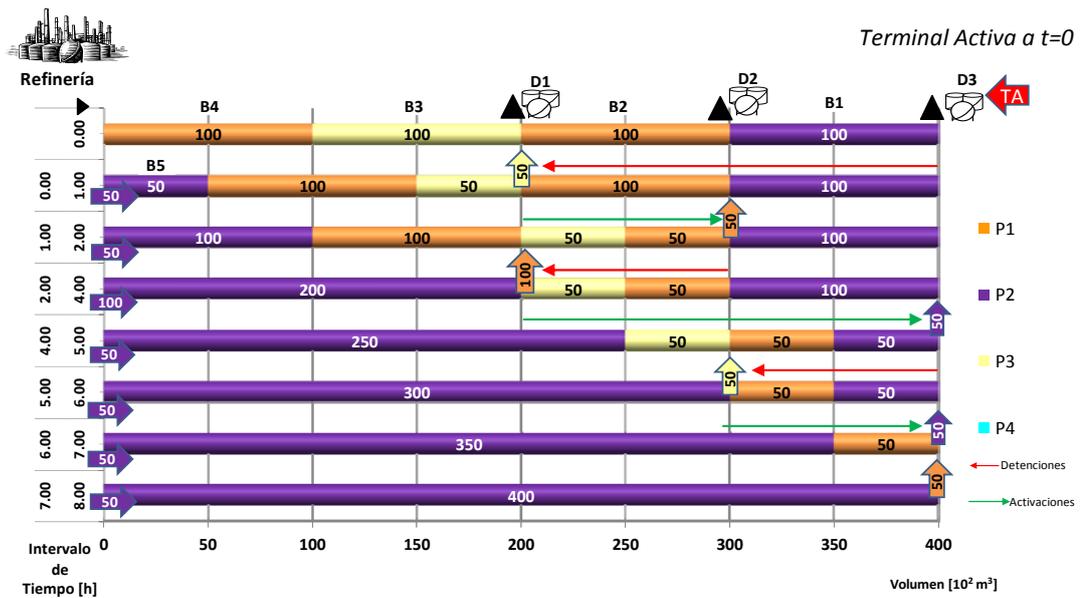


Figura IV.2. Programa detallado priorizando la entrega al depósito más cercano al origen

En la Figura IV.2, se indica con una flecha roja las secciones del poliducto donde el fluido permanece inmóvil, y con una flecha verde las secciones donde el fluido se pone en movimiento durante cada corrida de bombeo. A continuación se describe la estrategia de resolución del ejemplo motivador, priorizando la atención de las terminales más cercanas al origen.

Se supone que toda la tubería estaba activa antes de la inyección del nuevo lote B5; es decir, la última terminal activa fue el depósito D3. De acuerdo al plan agregado existen dos entregas posibles para la terminal más cercana al origen (D1): 50 unidades de P3 y 100 unidades de P1 (ver la segunda línea de la Figura IV.1). Como la terminal D1 es la más cercana al origen y el lote B3 conteniendo el producto P3 está disponible para la entrega en dicha terminal, se procedió a derivar el volumen total demandado del lote B3 en el depósito D1 inyectando las primeras 50 unidades del "batch" B5 (P2). Durante dicha operación que dura 1 hora, se detiene el flujo en los segmentos D1–D2 y D2–D3 (ver flecha horizontal roja en la Figura IV.2). De acuerdo a la regla de selección debería priorizarse a

continuación la entrega de 100 unidades de P1 del lote B4 al depósito D1, pero ello no es posible debido a que el lote B4 aún no puede acceder a dicha terminal al tiempo $t = 1$ h. Descartando la entrega a la terminal D1, el próximo destino más cercano al origen es D2, que demanda 50 unidades de P1 procedente del lote B2. Ejecutando dicha entrega, se inyectan 50 unidades adicionales de B5 en el origen, poniendo en movimiento el fluido en el segmento D1-D2, como se indica en la Figura IV.2 con una flecha horizontal verde. Luego de completar la descarga de P1 al depósito D2 (a $t = 2$ h), se pueden descargar 100 unidades de producto P1 contenido en el lote B4 a la terminal D1. A ese fin, se detiene el flujo en el segmento D1-D2 y se inyectan 100 unidades adicionales de producto P2 en el origen. Aplicando la regla de atender la terminal más cercana al origen, y considerando que la demanda de D1 se encuentra satisfecha en su totalidad, es el turno del depósito D2, pero el "batch" a descargar aún no ha arribado a esa terminal. Por lo tanto la prioridad la tiene el depósito D3 que es abastecido con 50 unidades de P2 procedentes del lote B1 mientras se continúa inyectando un volumen equivalente del lote B5 en el origen del poliducto. Durante esta operación se reactiva el flujo en los segmentos D1-D2 y D2-D3. Al finalizar la entrega parcial de producto P3 a D3 (a $t = 5$ h) el lote B3 está disponible para la entrega al depósito D2. Por lo tanto, se ejecuta la entrega de 50 unidades de P3 desde B3 al depósito D2 deteniéndose nuevamente el flujo en el segmento D2-D3. Seguidamente, se lleva a cabo la entrega de producto P2 al depósito D3 que culmina a $t = 7$ h, inyectando 50 unidades adicionales del "batch" B5 en el origen. Finalmente 50 unidades de P1 son entregadas al depósito D3 desde el lote B2, sin necesidad de reactivar ningún segmento.

En total se producen dos reactivaciones en el segmento D1–D2 y dos en el tramo D2–D3. Más aún, la entrega de 100 unidades de P2 desde el lote B1 hacia el depósito D3, prescripta en el plan agregado, requiere un par de operaciones no consecutivas. Como consecuencia, es necesaria una sucesión de siete operaciones de bombeo para inyectar la totalidad del "batch" B5. Entre cada par de operaciones de bombeo, se debe proceder al cierre y apertura de válvulas de acceso a tanques de terminales. Tanto el segmento D1–D2 como D2–D3 tienen 100 unidades de capacidad volumétrica cada uno. Así, el volumen total reactivado está dado por: $2 \cdot 100 + 2 \cdot 100 = 400 [10^2 \text{ m}^3]$.

Los autores Hane y Ratliff en su publicación del año 1995, afirman que el menor valor posible para el volumen total activado se observa cuando la solución reporta una reactivación en cada segmento entre la última terminal activa al inicio del horizonte y el depósito más alejado al origen del poliducto. De acuerdo con este criterio, la Figura IV.3 muestra una solución superadora de la propuesta en la Figura IV.2 que involucra una reactivación en el segmento D1–D2 (línea 5 en la Figura IV.3) y sólo una activación en el segmento D2–D3 (línea 7 de la Figura IV.3). Con dicha solución el volumen total activado equivale a 200 unidades (10^2 m^3). El resultado hallado es más eficiente en términos de costos de reactivación. En consecuencia, el valor del volumen total activado para llevar a cabo las entregas de productos especificadas en el plan agregado se reducen a la mitad.

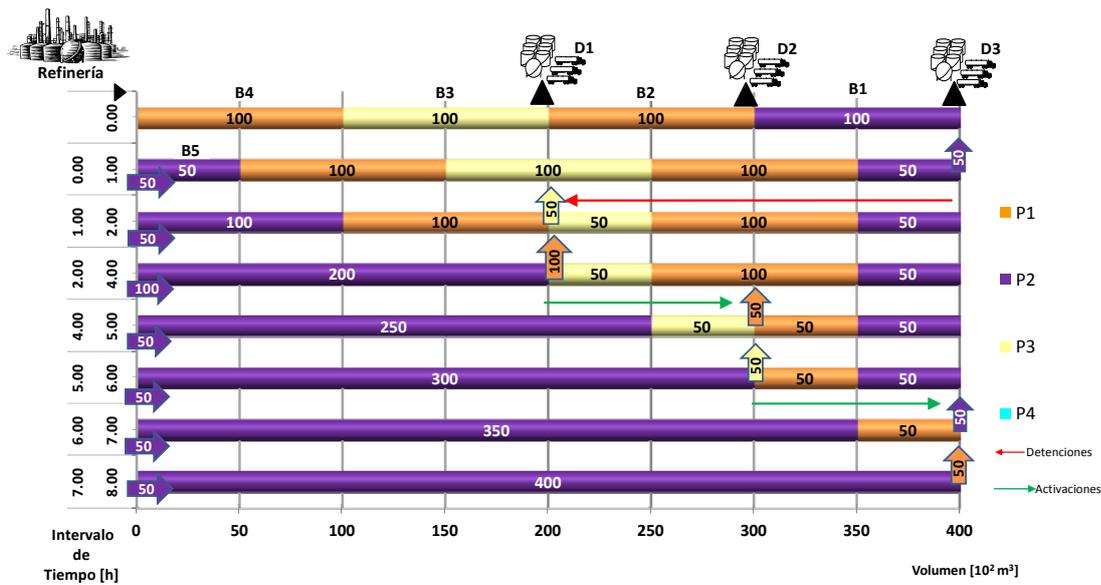


Figura IV.3. Programa detallado óptimo para el ejemplo motivador

En el "schedule" detallado de operaciones, la inyección de cada lote generalmente se descompone en una secuencia de corridas de bombeo de menor longitud, cada una asociada a un "corte" de lote diferente, y a una distinta operación de entrega o de despacho. Frecuentemente, una entrega agregada de un producto a una dada terminal es realizada a través de la ejecución de dos o más operaciones de corte no consecutivas. Como resultado, el número de corridas de bombeo asociadas a la inyección completa de un "batch" de producto podría exceder el número de operaciones agregadas de entregas.

Con el objetivo de evaluar la calidad del programa detallado obtenido, se utiliza el concepto de volumen total activado (AV) para medir el costo total de reactivaciones de segmentos del poliducto. AV representa el volumen total activado a lo largo del horizonte de planeación, es decir, el volumen acumulado de los segmentos del poliducto a activar para realizar las operaciones de entrega prescritas en el plan agregado. Un criterio equivalente se utiliza para contabilizar el volumen total detenido (SV) a lo

largo del horizonte de planeación, donde los segmentos "aguas abajo" de la terminal activa se detienen para realizar una operación de entrega "aguas arriba". En otras palabras, SV representa el volumen total cúmulo de segmentos activos a detener durante el horizonte de planeación. En la tercera línea de la Figura IV.3 se muestra el único caso de detención del flujo (ver flecha roja): la primera operación de entrega se realiza a la terminal D3, sin producir cambios en el estado de los segmentos por ser la última terminal activa; en la segunda operación que transcurre desde $t= 1.00$ h a $t= 2.00$ h, se entrega producto P3 al depósito D1. Para concretar este despacho se detiene el flujo en los segmentos D1-D2 y D2-D3, acumulando $SV= 200 [10^2 \text{ m}^3]$. En el resto del horizonte de planeación, los segmentos activos nunca se detienen. Más aún, el depósito D3, además de ser la terminal activa al inicio del plan ($t= 0.0$ h), también constituye la última terminal abastecida. Se puede comprobar que $AV = SV$ en la solución óptima, si la terminal activa al inicio del plan es la misma que al final del horizonte de planeación (ver el caso del depósito D3 en la Figura IV.3). De hecho, uno de ellos toma el valor más bajo cuando el otro criterio se minimiza y vice versa. Pero los valores mínimos difieren en el contenido de los segmentos conectando la terminal activa al inicio del horizonte con la terminal receptora al final del horizonte. Es decir, $\Delta = \sigma_{final} - \sigma_{inicial}$, donde σ_j representa la coordenada volumétrica de la terminal j desde el origen del poliducto. Más precisamente, $AV = SV + \Delta$ en cada "schedule" detallado.

A continuación, en la Sección IV.3, se listan las hipótesis de trabajo y en las secciones siguientes se presenta una formulación rigurosa lineal mixta entera (MILP) a través de la cual se obtiene la solución óptima que represente el mejor "schedule" detallado. Seguidamente, se describen las estrategias de descomposición propuestas para obtener soluciones

cercanas al óptimo o incluso soluciones óptimas con esfuerzos computacionales reducidos, no obstante que los problemas a resolver presenten grandes dimensiones.

IV.3.HIPÓTESIS DE TRABAJO

- (a) El sistema estudiado consiste en un poliducto que transporta varios productos desde una estación de inyección hacia varias terminales de destino ubicadas a lo largo de la línea.
- (b) Se dispone de un plan agregado de operaciones del poliducto, obtenido en una etapa previa, que describe la secuencia de lotes de productos a inyectar en el origen y el conjunto de entregas a terminales a realizar durante cada corrida de bombeo.
- (c) Cada vez que una operación detallada de bombeo se lleva a cabo, sólo se pueden realizar entregas simples; es decir, puede haber como máximo una sola descarga de producto desde un único lote a una única terminal receptora, durante cada operación.
- (d) El flujo de los segmentos aguas abajo de la terminal abastecida se detiene por completo mientras se realiza una operación de entrega.
- (e) Los costos de consumo de energía de bombeo y de mantenimiento de las bombas están directamente relacionados con la cantidad de reactivaciones de segmentos inactivos del poliducto y con el número de encendido y apagado de bombas impulsoras, respectivamente.

A los efectos de comparar los resultados obtenidos con los hallados en el Capítulo III se incluye la suposición (c), debido a que el modelo de simulación de eventos discretos no considera entregas simultáneas a

múltiples terminales durante una misma inyección. En concordancia con dicha suposición, el programa matemático de tipo lineal mixto entero (MILP) que se describe en el próximo apartado, supone un patrón secuencial de entregas a realizarse durante cada corrida detallada de bombeo.

IV.4. MODELO MATEMÁTICO PARA LA PROGRAMACIÓN ÓPTIMA DE OPERACIONES DETALLADAS EN POLIDUCTOS CON UNA ÚNICA FUENTE

A continuación se presentan los conjuntos y parámetros a considerar en la formulación matemática propuesta.

IV.4.1 Conjuntos y parámetros del modelo

Como se supone que el plan agregado, hallado en una etapa previa, está disponible, se contará con los siguientes datos:

- (a) Un conjunto ordenado de lotes residentes en el poliducto al inicio del horizonte de programación (J^{old}) así como el producto que contiene y el tamaño de cada uno de ellos.
- (b) Un conjunto ordenado de nuevos lotes genéricos a inyectar desde el origen del poliducto (J^{new}) durante el horizonte a programar, cuyo producto transportado y el tamaño han sido determinados en el plan agregado.
- (c) Un conjunto de productos $P = \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}\}$ a transportar a través del poliducto.
- (d) Un sub-conjunto de terminales receptoras $J_{i,i'}$ que incluye los depósitos $j \in J$ que reciben producto del lote i durante la inyección de un nuevo lote $i' \in J^{new}$ ($i' \geq i$), conforme a lo prescrito por el plan agregado.
- (e) El tamaño original del nuevo "batch" $i' \in J^{new}$ inyectado en el origen del poliducto, representado por $qq_{i'}$.

- (f) El tamaño $dd_{ij}^{(i')}$ de la entrega agregada de producto desde el "batch" $i \in I$ al depósito $j \in J_{i,i'}$ mientras se inyecta el lote $i' \in I^{new}$.
- (g) La coordenada volumétrica σ_j de cada terminal $j \in J$, medida desde el origen del poliducto.
- (h) Los tiempos de inicio (st_{ij}) y finalización (ft_{ij}) de la operación de inyección del "batch" $i' \in I^{new}$.
- (i) El intervalo de valores factibles de la velocidad de bombeo [$vb_{\min}^{(i')}$; $vb_{\max}^{(i')}$] para la inyección del lote $i' \in I^{new}$, con valor medio igual al adoptado para desarrollar el plan agregado.
- (j) Para formular el problema de programación detallada de operaciones del poliducto es necesario definir un conjunto ordenado de operaciones genéricas $K = K_{i1} \cup K_{i2} \cup \dots \cup K_{in}$ para obtener la secuencia "desagregada" de operaciones de inyección que se llevarán a cabo durante el horizonte de planeación. Los elementos $\{i_1, i_2, \dots, i_n\} \in I^{new}$ son los lotes nuevos que serán inyectados en el poliducto. A su vez, el subconjunto K_{i1} representa la secuencia de operaciones de "corte" requeridas para inyectar completamente el lote $i1$. Desde el punto de vista cronológico, la operación $k - 1$ precede inmediatamente a la operación k . Más aún, se dice que el elemento $k \in K$ es una corrida de bombeo ficticia si la inyección nunca se ejecuta. A pesar que la cardinalidad de cada subconjunto $K_{i'}$ no se conoce de antemano, se puede establecer un valor mínimo $|K_{i'}|$ dado por la cantidad de entregas agregadas planificadas durante la inyección del "batch" i' , es decir, $|K_{i'}| \geq \sum_{j \in J_{i,i'}} |J_{i,j}|$. Ese valor mínimo coincidirá con el número de operaciones si cada entrega de un producto a un depósito prescrita en el plan

agregado se realiza a través de una única corrida detallada de bombeo.

IV.4.2 Variables del problema

Se definen conjuntos de variables continuas y binarias similares a las utilizadas para el modelo de planeación agregada:

Variables binarias:

u_k representa la existencia de la corrida k ;

$x_{i,j}^{(k)}$ denota la ejecución de una operación de entrega desde el "batch" i al depósito j durante la operación k , si $x_{i,j}^{(k)} = 1$

Variables continuas:

Q_k el volumen inyectado en la tubería durante la operación de bombeo k .

L_k la duración de cada operación k .

C_k la hora de finalización de la operación k .

$D_{i,j}^{(k)}$ la cantidad de producto del "batch" i entregada al depósito j durante la ejecución de la operación k .

$W_i^{(k)}$ el volumen del "batch" i al tiempo de finalización C_k .

$F_i^{(k)}$ la coordenada superior del "batch" i al tiempo C_k .

AV_k el volumen activado, representa el incremento de los segmentos que se activan durante la operación k .

SV_k el volumen detenido, denotando la reducción de los segmentos activos del poliducto mientras se ejecuta la operación k .

Las dos últimas variables continuas AV_k y SV_k se introducen para medir la calidad del "schedule" detallado.

IV.4.3 Restricciones del modelo

Se consideran cuatro tipos de restricciones:

- (1) Restricciones para definir las características de las operaciones de inyección (duración, sincronización, y cantidad inyectada).
- (2) Restricciones para el seguimiento del contenido y la localización de cada lote en tránsito a lo largo del poliducto.
- (3) Restricciones para controlar la factibilidad y el tamaño de las operaciones de entrega.
- (4) Restricciones para definir el volumen activado y detenido en cada corrida.

A continuación se realiza una descripción del significado e importancia de cada una de las ecuaciones del modelo.

IV.4.3.1 Restricciones asociadas a las corridas de bombeo

Secuenciamiento de operaciones de bombeo. La operación detallada k puede iniciarse sólo si la operación previa ($k-1$) ha finalizado.

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall k \in K_i, i \in I^{new} \quad (IV.1)$$

Tiempo de Inicio del primer elemento del conjunto K_i . La primera operación de inyección de un nuevo lote $i \in I^{new}$ no debe iniciarse antes del tiempo st_i especificado en el plan agregado para la inyección del "batch" i .

$$C_k - L_k \geq st_i \quad \forall i \in I^{new}, k = first(K_i) \quad (IV.2)$$

Cota superior en el tiempo de culminación de cada corrida $k \in K_i$. Cada corrida $k \in K_i$ no puede terminar antes del tiempo de finalización ft_i , especificado en el plan agregado para la inyección del "batch" $i \in I^{new}$.

$$C_k \leq ft_i \quad \forall i \in I^{new}, k \in K_i \quad (IV.3)$$

Volumen inyectado mediante la operación k y su duración L_k . Supongamos que la operación k inyecta el "batch" i' ($k \in K_{i'}$). Si $u_k = 0$, la

operación k es ficticia. Luego, su duración es nula ($L_k = 0$) y el volumen inyectado es cero ($Q_k = 0$). Por otra parte, la velocidad de inyección durante la corrida tiene que estar dentro del intervalo factible $[vb_{\min}^{(i')}, vb_{\max}^{(i')}]$. Dicho intervalo está definido considerando como valor medio el caudal de inyección adoptado para el lote i' en el nivel de planificación agregada. Estas restricciones sobre los valores de L_k y Q_k se modelan a través de las ecuaciones (IV.4) y (IV.5).

$$vb_{\min}^{(i')} L_k \leq Q_k \leq vb_{\max}^{(i')} L_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (IV.4)$$

$$l_{\min} u_k \leq L_k \leq l_{\max}^{(i')} u_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (IV.5)$$

Allí, el parámetro l_{\min} es un valor pequeño mientras que la cota superior $l_{\max}^{(i')}$ está dada por: $l_{\max}^{(i')} = \max_{\substack{i \leq i' \\ j \in J_{i,i'}}} \{D_{i,j}^{(i')}\} / vb_{\min}^{(i')}$.

Las operaciones ficticias son ubicadas al final de cada conjunto ordenado K_i . Para evitar múltiples soluciones equivalentes, las operaciones ficticias relacionadas con la inyección de un nuevo "batch" i siempre deben ubicarse al final del conjunto ordenado K_i .

$$u_k \leq u_{k-1} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K_i, k > first(K_i) \quad (IV.6)$$

Cumplimiento del plan agregado. El volumen total bombeado dentro del poliducto, mientras se realiza la secuencia de corridas $k \in K_i$, tiene que ser igual al tamaño original del lote i , qq_i dado en el plan agregado.

$$\sum_{k \in K_i} Q_k = qq_i \quad \forall i \in I^{new} \quad (IV.7)$$

IV.4.3.2 Restricciones para el seguimiento de lotes en tránsito

Relación entre las coordenadas superiores de dos lotes consecutivos al final de la corrida k . Como el lote $(i+1)$ es introducido en la línea inmediatamente después del lote i , se mueve justo detrás del "batch" i a lo largo de todo el poliducto (ver Figura IV.4). Por lo tanto, la coordenada superior de ambos lotes se relacionan por la ecuación (IV.8), donde $W_i^{(k)}$ es el tamaño del "batch" i al tiempo final de la corrida $k \in K_i$ inyectando un lote posterior $i' > i$.

$$F_{i+1}^{(k)} + W_i^{(k)} = F_i^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i+1, k \in K_i \quad (IV.8)$$

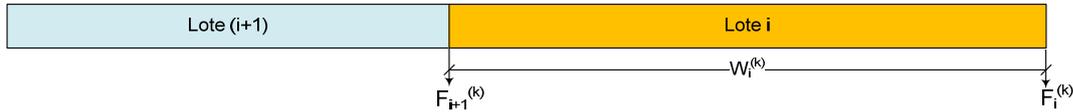


Figura IV.4. Relación entre las coordenadas superiores de lotes adyacentes al final de la corrida k .

Tamaño del nuevo "batch" $i' \in I^{new}$ al final de la corrida $k \in K_{i'}$ inyectando el lote i' . El contenido del lote i' al final de la corrida $k \in K_{i'}$ en la cual se inyecta una porción de "batch" i' en la línea ($W_{i'}^{(k)}$) se puede obtener a partir de considerar el tamaño que tenía al final de la operación anterior ($k-1$). Es decir, sumando a su tamaño al tiempo C_{k-1} ($W_{i'}^{(k-1)}$) el volumen total inyectado a través de la operación k , y restando la cantidad entregada desde el mismo lote i' a las terminales durante la corrida k . Para $k = first(K_{i'})$, $W_{i'}^{(k-1)} = 0$. En la ecuación (IV.9), el subconjunto de terminales $J_{i',i'} \subset J$ incluye las terminales donde se descargan porciones del lote i' durante la inyección de ese lote.

$$W_{i'}^{(k)} = W_{i'}^{(k-1)} + Q_k - \sum_{j \in J_{i',i'}} D_{i',j}^{(k)} \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (IV.9)$$

Tamaño del lote $i \in I$ al final de la corrida $k \in K_{i'}$ que inyecta un lote posterior $i' > i$. En este caso, el lote i no está siendo inyectado por la operación $k \in K_{i'}$ sino un lote posterior $i' > i$. Por lo tanto, $W_i^{(k)}$ puede computarse a partir de $W_i^{(k-1)}$ simplemente substrayendo el volumen total transferido a las terminales de destino desde el lote i durante la corrida k . Puede ocurrir que la operación k no se ejecute, es decir que sea una operación ficticia ($u_k = 0$). En ese caso, $W_i^{(k)}$ será igual al contenido del lote i al final de la operación anterior, porque tanto Q_k como $D_{i,j}^{(k)}$ toman un valor nulo cuando las operaciones son ficticias. Para $k = 1$, el lote i proviene de la línea de contenido inicial; por lo tanto $W_i^{(k-1)}$ es igual al contenido inicial w_{0i} del viejo lote i .

$$W_i^{(k)} = W_i^{(k-1)} - \sum_{j \in J_{i,i'}} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' > i, k \in K_{i'} \quad (IV.10)$$

En la ecuación (IV.10), el subconjunto de terminales $J_{i,i'}$ abarca los depósitos que reciben porciones del lote i cuando se inyecta el lote i' ($i' > i$) en el origen del poliducto.

IV.4.3.3 Restricciones asociadas a las operaciones de entrega de productos

Cota en la cantidad de producto entregado. El volumen despachado desde el lote $i \in I$ hacia alguna terminal $j \in J_{i,i'}$ durante la corrida $k \in K_{i'}$ ($D_{i,j}^{(k)}$) debe pertenecer al intervalo factible $[d_{min}, dd_{i,j}^{(i')}]$. El parámetro d_{min} es un valor pequeño mientras que la cota superior está dada por $dd_{i,j}^{(i')}$ que representa el tamaño de la porción de lote i a entregar a la terminal $j \in J_{i,i'}$ durante la inyección del lote $i' \geq i$, prescrita en el plan agregado.

$$d_{min} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq dd_{i,j}^{(i')} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i, j \in J_{i,i'}, k \in K_{i'} \quad (IV.11)$$

Una única operación de entrega por operación de inyección. Debido a la incompresibilidad de los líquidos, el mismo volumen que se inyecta durante una operación k debe despacharse hacia las terminales. Sin embargo, de acuerdo a las hipótesis de trabajo, no pueden realizarse entregas simultáneas desde el poliducto a múltiples terminales durante una operación de inyección detallada. La restricción (IV.12) asegura que, como máximo, un único "batch" se despache a una única terminal receptora. Dicho de otra manera, sólo se permite la derivación de un producto refinado a un único depósito durante la ejecución de una operación no ficticia. Luego, la cardinalidad del conjunto $K_{i'}$ nunca puede ser menor que el número de entregas agregadas a ser realizadas mientras se inyecta el lote i' , es decir, $\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} |J_{i,i'}|$. Si la corrida k nunca se ejecuta ($u_k = 0$), y entonces no hay entrega de producto.

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} x_{i,j}^{(k)} = u_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (IV.12)$$

Condiciones de factibilidad para la entrega de una porción de lote i . Para despachar producto desde el lote i hacia alguna terminal $j \in J_{i,i'}$ durante una operación no-ficticia $k \in K_{i'}$, la coordenada superior del "batch" i al final de la corrida k no puede ser menor que la coordenada del depósito σ_j . Es decir, se tiene que cumplir $F_i^{(k)} \geq \sigma_j$. Luego,

$$F_i^{(k)} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i, j \in J_{i,i'}, k \in K_{i'} \quad (IV.13)$$

Más aún, la coordenada del "batch" i al comienzo de la operación k debe ser menor que σ_j , por al menos el volumen $D_{i,j}^{(k)}$ ($\leq dd_{i,j}^{(i)}$) despachado a la terminal j durante la operación $k \in K_{i'}$; o sea, $[F_i^{(k-1)} - W_i^{(k-1)}] \leq \sigma_j - D_{i,j}^{(k)}$. Si alguna de las condiciones de factibilidad no pueden ser satisfechas,

entonces $x_{i,j}^{(k)} = 0$ y las restricciones (IV.13) y (IV.14) se tornan redundantes. Además, de acuerdo a la ecuación (IV.11), no hay entrega de producto ($D_{i,j}^{(k)} = 0$).

$$F_i^{(k-1)} - W_i^{(k-1)} + D_{i,j}^{(k)} \leq \sigma_j + (pv - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad (IV.14)$$

$$\forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i, j \in J_{i,i'}, k \in K_{i'}$$

El parámetro pv corresponde al volumen total del poliducto. La restricción (IV.14) no tiene en cuenta las entregas de producto provenientes del mismo lote i a las terminales j' ubicadas aguas arriba de j con $\sigma_{j'} < \sigma_j$, porque sólo se permite una única entrega durante cada operación k .

Cota adicional para el tamaño de las entregas de producto. Hasta el momento, el volumen $D_{i,j}^{(k)}$ transferido desde el "batch" i hacia la terminal $j \in J_{i,i'}$ durante la corrida $k \in K_{i'}$ se encuentra acotado por las restricciones (IV.11) y (IV.14). Dichas restricciones fuerzan la variable $D_{i,j}^{(k)}$ para que nunca exceda $dd_{i,j}^{(i)}$ ó $[\sigma_j - (F_i^{(k-1)} - W_i^{(k-1)})]$, respectivamente. Adicionalmente, el volumen $D_{i,j}^{(k)}$ transferido desde el lote i a una potencial terminal receptora j durante una operación k no puede ser más grande que el contenido del lote i al final de la operación previa anterior ($k-1$):

$$\sum_{j \in J_{i,i'}} D_{i,j}^{(k)} \leq W_i^{(k-1)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i, k \in K_{i'} \quad (IV.15)$$

Balance exacto entre el volumen inyectado y el despachado durante una operación k . Debido a la propiedad de incompresibilidad de los líquidos, la cantidad de producto que ingresa al poliducto durante la corrida k tiene que ser igual al volumen total transferido desde el poliducto a la terminal seleccionada.

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} D_{i,j}^{(k)} = Q_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (IV.16)$$

Cumplimiento del plan agregado de entregas. El volumen total despachado desde el lote i hacia la terminal $j \in J_{i,i'}$ durante la secuencia de corridas $k \in K_{i'}$ debe ser igual a la cantidad especificada en el plan agregado $dd_{i,j}^{(i')}$.

$$\sum_{k \in K_{i'}} D_{i,j}^{(k)} = dd_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new}, i' \geq i, j \in J_{i,i'} \quad (IV.17)$$

IV.4.3.4 Definición del volumen activado y detenido

El concepto de "volumen activado" se introduce para medir una componente importante, el costo de bombeo asociado a la puesta en movimiento del fluido en segmentos previamente inactivos del poliducto. El volumen de combustible contenido en esos segmentos inactivos se restaura cuando la entrega siguiente corresponde a una terminal ubicada aguas abajo; es decir, más alejada del origen de la tubería. Por lo tanto, es importante considerar las coordenadas de las terminales activas j' y j en las operaciones $(k-1)$ y k , respectivamente, para determinar el volumen activado (AV_k) durante la operación k . Si $\sigma_j > \sigma_{j'}$ significa que durante la operación k la terminal j , localizada aguas abajo de j' , respecto de la operación anterior, recibe producto. En ese caso, el volumen activado por la operación k es igual a $AV_k = \sigma_j - \sigma_{j'}$. Si en cambio, la terminal receptora j está ubicada más cerca del origen que j' entonces $\sigma_j < \sigma_{j'}$ no hay secciones activas. Por el contrario, se detiene el flujo en los segmentos que conectan ambas terminales. Se observa así un incremento en el volumen detenido (SV_k) durante la operación k , dado por $SV_k = \sigma_{j'} - \sigma_j$. Note que σ_j es el volumen de poliducto entre el origen y la localización del depósito j .

Cada vez que cambia la terminal receptora se produce la activación o detención del flujo de fluido en uno o más segmentos del poliducto. Más aún, si no existen cambios en la terminal de destino entre las operaciones k y $(k-1)$ esto implica que la operación k no genera ni activación ni detención de segmentos ($AV_k = SV_k = 0$).

Si la terminal más lejana está recibiendo producto, el poliducto estará activo en forma completa. Por el contrario, el mayor volumen detenido se produce cuando el depósito más cercano al origen es seleccionado como terminal de destino. En este último caso, el volumen contenido entre dicho depósito y la terminal más alejada al origen permanecerá detenido.

Queda claro que la decisión de selección de la secuencia de terminales de recepción, afecta fuertemente al volumen total activado y los costos de encendido y apagado de las bombas.

Las restricciones (IV.18–IV.19) y (IV.20–IV.21) definen una cota inferior sobre el valor del volumen activado (AV_k) ó detenido (SV_k) a causa de la operación k , respectivamente. Las ecuaciones (IV.18) y (IV.20) suponen $k > first(K_i)$, mientras que las ecuaciones (IV.19) y (IV.21) se aplican a la operación $k = first(K_i)$ que inserta la primera porción del nuevo "batch" i' . En el último caso la operación previa $(k-1) \in K_{i'-1}$ corresponde al último elemento asociado a la inyección del lote $(i'-1)$, y probablemente sea ficticia. La terminal activa actual es la que efectivamente se encuentra recibiendo producto cuando se inyecta el último elemento del "batch" $(i'-1)$ en el poliducto. Tal como se mencionara, la cardinalidad de $K_{i'-1}$ debe ser, como mínimo, igual al número de entregas prescriptas en el plan agregado a ser ejecutadas mientras se inyecta el lote $(i'-1)$, es decir, $\sum_i |J_{i,i'-1}|$, con $i \leq i'-1$. Por lo tanto, los candidatos a ser los últimos elementos no ficticios de

la corrida del lote ($i'-1$) son aquellos elementos del conjunto $K_{i'-1}$ que se encuentran ocupando las posiciones finales.

$$AV_k \geq \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} \sigma_j x_{i,j}^{(k)} - \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} \sigma_j x_{i,j}^{(k-1)} \quad (IV.18)$$

$$\forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'}, k > first(K_{i'})$$

$$AV_k \geq \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} \sigma_j x_{i,j}^{(k)} - \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'-1}} \sum_{j \in J_{i,i'-1}} \sigma_j x_{i,j}^{(k')} + pv \left(\sum_{l=first(k_{i'-1})}^{k'} u_l - \sum_{l'=first(k_{i'-1})}^{k'+1} u_{l'} + (u_{k'} - 1) \right) \quad (IV.19)$$

$$\forall i' \in I^{new}, k = first(K_{i'}), k' \in K_{i'-1}$$

$$SV_k \geq \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} \sigma_j x_{i,j}^{(k-1)} - \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'}, k > first(K_{i'}) \quad (IV.20)$$

$$SV_k \geq \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'-1}} \sum_{j \in J_{i,i'-1}} \sigma_j x_{i,j}^{(k-1)} - \sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} \sigma_j x_{i,j}^{(k)} + pv \left(\sum_{l=first(k_{i'-1})}^{k'} u_l - \sum_{l'=first(k_{i'-1})}^{k'+1} u_{l'} + (u_{k'} - 1) \right) \quad (IV.21)$$

$$\forall i' \in I^{new}, k = first(K_{i'}), k' \in K_{i'-1}$$

Las restricciones (IV.19) y (IV.21) se vuelven activas cuando $u_{k'} = 1$ y $u_{k'+1} = 0$, donde $k' \in K_{i'-1}$, y k' es el último elemento no ficticio de $K_{i'-1}$. Para $k=1$ o sea, $k \in K_{first(i)}$ (primera operación de bombeo correspondiente al primer lote que se inyecta en la línea), la coordenada de la terminal receptora $\sigma_{j'}$ de la corrida previa $k-1$ (última operación realizada en el horizonte de planeación anterior) es un dato del problema. Si en cambio, todo el poliducto está detenido al tiempo $t = 0$, luego $\sigma_{j'} = 0$ para la primera corrida ($k = 1$).

IV.4.4. Función Objetivo

El objetivo del problema consiste en determinar el programa detallado de las operaciones de inyección y entrega de productos a terminales que da

cumplimiento a las metas establecidas en el plan agregado, minimizando los costos de encendido y apagado de bombas y de reinicio del flujo en segmentos del poliducto. Es decir, tomando como información de entrada el plan "master", se busca obtener el plan detallado de entregas que minimiza el volumen de activación y detención del flujo en secciones del poliducto a través del menor número de operaciones de bombeo:

$$\text{Min } z = \sum_{k \in K} (cs SV_k + ca AV_k + fco u_k) \quad (\text{IV.22})$$

En esta última ecuación, *cs* representa el costo unitario de detención del flujo; *ca* es el costo por unidad de volumen reactivado; y *fco* constituye una estimación del costo fijo asociado a la ejecución de una operación de entrega.

En resumen, el enfoque propuesto está basado en una formulación lineal mixta entera (MILP) que incluye las restricciones (IV.1) a (IV.21) y la función objetivo expresada por la relación (IV.22).

Cabe aclarar que el plan agregado puede presentar alguna detención total del poliducto por mantenimiento o algún otro propósito. En ese caso, el modelo de refinamiento propuesto se aplicará secuencialmente a cada período activo.

IV.5. ESTRATEGIAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DE LA FORMULACIÓN MILP

El tamaño de la formulación MILP propuesta para obtener el "schedule" detallado de operaciones de un poliducto con una única entrada en el origen está directamente relacionado con la cardinalidad del conjunto *K*. El valor de $|K|$ es fuertemente influenciado por la duración del horizonte de planeación (h_{max}), debido a que el número de lotes a inyectar puede

incrementarse significativamente con la duración del horizonte. Dado que la formulación presentada en la sección IV.4, tiene en cuenta el conjunto K completo, su solución puede requerir elevados tiempos computacionales si se considera, por ejemplo, un horizonte mensual ($h_{max}= 1$ mes).

Para reducir el tiempo computacional, cuando las dimensiones del problema lo ameriten, se propone aplicar técnicas de descomposición que dividen el conjunto K en sub-conjuntos más pequeños ($K1, K2, \dots$), para generar un conjunto equivalente de sub-problemas de menor tamaño. De este modo, se puede resolver la formulación MILP original, cuyo tamaño es considerablemente grande, a través de la resolución de una secuencia de sub-problemas MILP más pequeños.

A tal fin, se proponen tres técnicas alternativas de solución, a saber:

- I. Algoritmo de descomposición total (*FD*: "Full Decomposition").
- II. Algoritmo de descomposición de a pares (*PD*: "Pair Decomposition").
- III. Algoritmo de solución sin descomposición (*ND*: "Non- Decomposition").

La técnica *FD* descompone el problema en tantos sub-problemas como lotes a inyectar existan en el plan agregado, y luego combina las soluciones óptimas de cada sub-problema de inyección, para obtener una buena solución del problema de "schedule" detallado de poliductos. En algunos casos pueden existir acoplamientos débiles entre las decisiones de los sub-problemas. Usualmente, el impacto de la secuencia de selección de las terminales de recepción durante la inyección del lote i está principalmente limitada a la inyección del siguiente lote $i+1$. Este hallazgo empírico es la base fundamental del algoritmo llamado *PD* ("Descomposición de a pares") a través del cual normalmente se obtiene la solución óptima del MILP

original para el problema de programación detallada, a costos computacionales menores.

A continuación se explica con mayor detalle cada uno de los algoritmos desarrollados.

IV.5.1 Descomposición Total (FD)

Para generar un "schedule" detallado óptimo ó sub-óptimo, el algoritmo de descomposición total resuelve tantos sub-problemas MILP como lotes a inyectar prescritos en el plan agregado. Cada sub-problema provee el "schedule" refinado para la inyección de un "batch", es decir, $|I^{new}| = 1$. Si el lote $i1$ precede a $i2$, el sub-problema para el sub-conjunto de operaciones K_{i1} (conjunto ordenado de operaciones para la inyección del lote $i1$) se resuelve antes que el relacionado a K_{i2} y así se puede conocer la última terminal activa al finalizar la inyección del lote $i1$ (terminal activa al inicio de la inyección de $i2$).

Una buena solución al problema puede ser determinada añadiendo de manera recursiva el "schedule" obtenido para la inyección del lote $i+1$ al final del programa hallado para el "batch" i . Aunque el costo computacional global disminuye drásticamente, la técnica de solución *FD*, tiene claras limitaciones que llevan a obtener soluciones sub-óptimas. El mayor inconveniente surge del hecho que generalmente existe un cierto grado de acoplamiento en las decisiones de elección de la secuencia de terminales receptoras, correspondientes a la inyección de un par de lotes. Es decir, la planificación de entregas detalladas durante las inyecciones i e $(i+1)$ deberían realizarse conjuntamente. Como consecuencia, normalmente se obtienen soluciones sub-óptimas afrontando costos de re-activación de flujo por encima del valor mínimo.

IV.5.2 Algoritmo de descomposición de a pares (*PD*)

Similarmente al algoritmo de descomposición total, el algoritmo de descomposición de a pares (*PD*) resuelve tantos sub-problemas MILP como inyecciones agregadas estén planificadas. Pero en este caso se trabaja con un conjunto ordenado de sub-problemas MILP, cada uno determinando de manera simultánea el "schedule" detallado para dos inyecciones consecutivas. Primeramente se resuelve el sub-problema para el conjunto $K1 = K_{i1} \cup K_{i2}$, luego para $K2 = K_{i2} \cup K_{i3}$ y así sucesivamente. De esta manera, el algoritmo de descomposición de a pares va determinando el programa detallado correspondiente a la inyección del lote i , teniendo en cuenta la secuencia de terminales activas durante la inyección del "batch" $(i+1)$. No obstante, únicamente el programa hallado para el lote i es adoptado en la solución final del problema, mientras que la programación de operaciones relacionada con la inyección del lote $(i+1)$ se obtiene resolviendo el próximo MILP, donde se tiene en cuenta la inyección del par de lotes $(i+1)$ e $(i+2)$. En otras palabras, el "schedule" detallado se obtiene de manera gradual y se va actualizando a medida que el horizonte de programación avanza. Para muchos casos de estudios, el algoritmo de descomposición de a pares (*PD*) provee la solución óptima.

En la Figura IV.5 se presenta un diagrama de flujo donde se resume el esquema de solución utilizado por el algoritmo *PD*. El número de corridas individuales considerado en cada sub-problema MILP se incrementa hasta que se detecta que no hay mejoras en la función objetivo. Se supone que el "schedule" detallado óptimo se encuentra cuando hay al menos un elemento ficticio en los conjuntos K_i considerados en cada sub-problema.

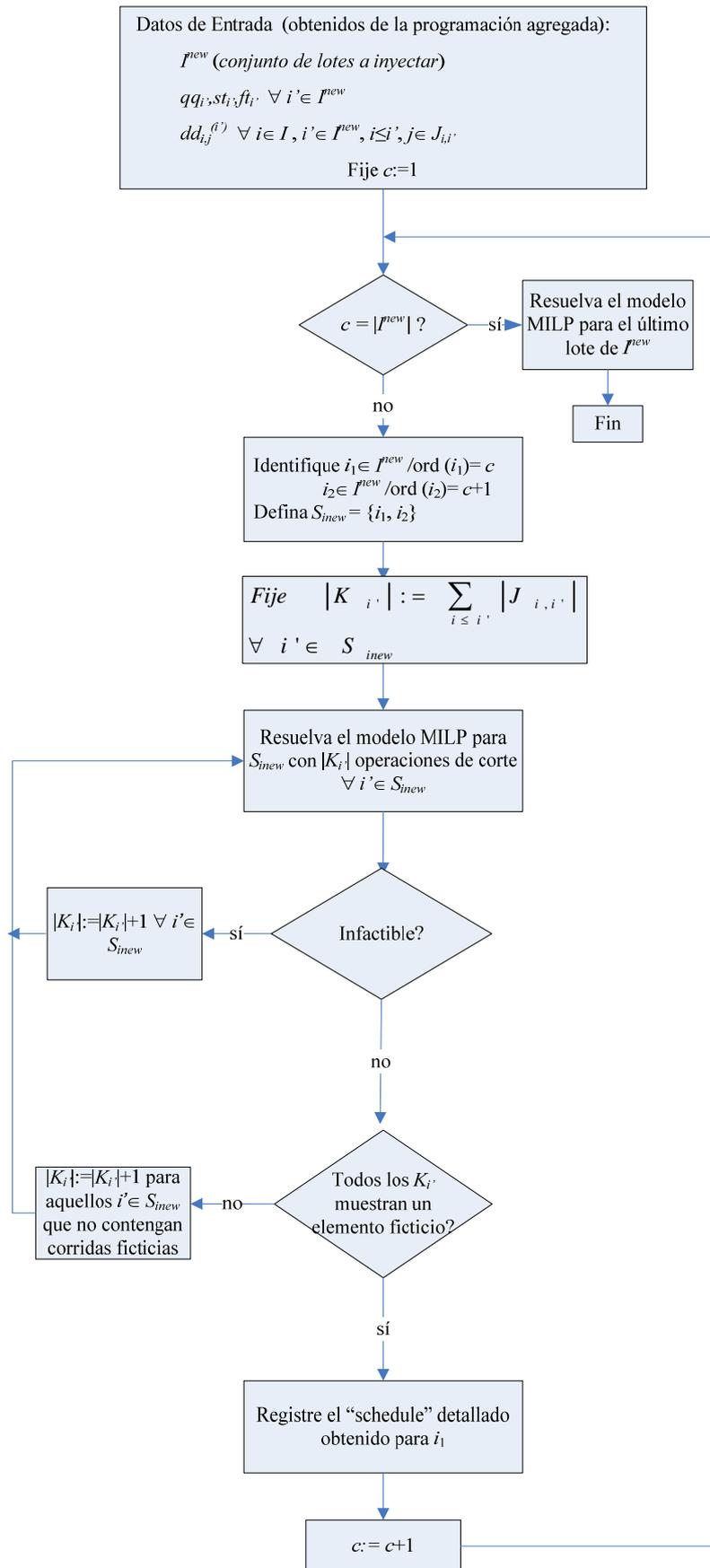


Figura IV.5. Procedimiento Iterativo del algoritmo PD

IV.5.3 Algoritmo sin descomposición (*ND*)

Por su parte, el algoritmo *ND* resuelve el problema MILP completo de una sola vez; es decir, a través de una única instancia de resolución. Así, se busca hallar la estrategia operacional óptima mediante la resolución de un único modelo matemático MILP que considere todas las inyecciones planeadas a nivel agregado. Inicialmente, el número de operaciones individuales se fija en su cota inferior; es decir, $|K| = \sum_i \sum_{i \leq j} |J_{i,j}|$. Este valor inicial que corresponde al número total de entregas prescriptas en el plan agregado, luego se va incrementando de a una unidad hasta que no se observen mejoras en el valor de la función objetivo ó aparezca al menos un elemento ficticio en cada subconjunto k_i , $i \in I^{new}$. Si el modelo MILP es factible, la solución obtenida brinda el óptimo global del problema a un costo computacional más elevado.

IV.6. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y ESTRATEGIAS DE RESOLUCIÓN A DISTINTAS VARIANTES DE UN CASO DE ESTUDIO

A lo largo de esta sección se resuelve el mismo caso de estudio presentado en el capítulo anterior. Esta vez, aplicando las diferentes estrategias de resolución de la formulación MILP propuesta en el presente capítulo. El mencionado caso de estudio involucra la distribución de cuatro productos (gasolina, diesel, LPG, y jet-fuel). Se considera el problema de determinar el "schedule" detallado de operaciones para un sistema con una única fuente y múltiples terminales receptoras con un horizonte de planeación de hasta cuatro semanas.

Se plantean tres variantes. Las alternativas difieren en la longitud del horizonte de planeación y consecuentemente en el tamaño del modelo a resolver. El Ejemplo IV.1 considera el plan agregado relacionado con la

inyección del primer lote programado (B7). El Ejemplo IV.2 abarca la programación detallada de las operaciones a realizarse durante un horizonte de planeación de dos semanas y por último, el Ejemplo IV.3 resuelve el problema completo, considerando el horizonte de planeación mensual. Estos mismos tres ejemplos se resuelven con el modelo de simulación de eventos discretos propuesto en el capítulo anterior, a fin de realizar un análisis crítico contrastando las soluciones arrojadas por ambas metodologías.

En cada instancia del problema se adoptan, para la función objetivo los siguientes valores de los coeficientes de costo que aparecen en la función objetivo: costo unitario de reactivación: $ca = 0.10$ [\$/m³]; costo unitario de detención: $cs = 0.00$ [\$/m³]; costo fijo de cada operación: $fco = 1000$ [\$/operación]. Los modelos MILP se resuelven con un procesador Intel Core i7 (3.33 GHz) usando como "solver" GAMS/GUROBI 3.0 (Brooke y colab., 2006) con cuatro nodos paralelos. Se adopta una tolerancia de 10^{-9} .

IV.6.1 Ejemplo IV.1

A los efectos de apreciar el desempeño computacional de las herramientas desarrolladas, se propone obtener el "schedule" detallado transformando el plan agregado en una secuencia óptima de operaciones. A través de este ejemplo se resuelve una instancia pequeña del caso de estudio, donde se pretende obtener el esquema detallado de operaciones óptimas a realizar mientras se inyecta el primer "batch" (B7). Por hipótesis, cada operación puede involucrar la entrega de producto desde un único lote a una única terminal mientras se inyecta producto en el origen del poliducto. La solución "agregada" provista por el enfoque de Cafaro y Cerdá (2008) descrita en la Figura III.5 del Capítulo III, especifica la ejecución de

nueve entregas agregadas durante la inyección del lote B7. Por lo tanto, la cardinalidad del conjunto de corridas (K) nunca puede ser inferior a dicho valor. En esta oportunidad se adopta $|K| = 10$, ya que con $|K| = 9$ la solución del modelo resultó ser infactible. Dicha infactibilidad estaría indicando que alguna de las entregas agregadas requiere ejecutar un par de operaciones no consecutivas.

La primera línea de la Figura IV.6 muestra los lotes al inicio de la programación y sus contenidos indicados como subíndices en $[10^2 \text{ m}^3]$: B6₄₂₅/ B5₄₀₀ / B4₅₅₀ / B3₁₉₀/ B2₇₀. Las operaciones de entrega a realizarse durante la inyección del "batch" B7 involucran a los depósitos D3, D4 y D5 cuyas demandas de productos son satisfechas por diversos lotes (desde B2 hasta B7). En la Tabla IV.1 se resume la demanda específica de cada destino y el lote fuente que satisface este requerimiento.

Considerando que al inicio de la inyección del "batch" B7 el depósito activo es el D4, se puede establecer de antemano una cota inferior para el volumen total activado dado por el contenido del segmento D4–D5 que conecta la terminal D4, activa al inicio de la programación, con la terminal de destino más lejana, D5. Dicho volumen es de 135 $[10^2 \text{ m}^3]$. Sin embargo, no existe ninguna solución factible que arroje como resultado dicho volumen activado, sino un valor mayor.

Tabla IV.1. Entregas agregadas mientras se inyecta el lote B7 (en 10^2 m^3)

Terminal	Lote a Entregar					
	B2	B3	B4	B5	B6	B7
D3						136
D4		120	410	152	10	
D5	70	70	140	248		

La mejor secuencia de operaciones a realizarse durante la inyección del "batch" B7, si se la considera aisladamente, se muestra en la Figura IV.6. La misma fue hallada resolviendo el modelo matemático propuesto a través del algoritmo *FD*, en tan sólo 0.33 segundos de tiempo de CPU. La solución muestra que el flujo debe ser reiniciado dos veces en el último tramo del poliducto (D4–D5) durante las corridas detalladas $k = 2$ y $k = 7$ (ver flechas verdes en las líneas 3 y 8 de la Figura IV.6). Como resultado, el volumen total activado (*AV*) es igual a $2 * (\sigma_{D5} - \sigma_{D4}) = 270 [10^2 \text{ m}^3]$. Tal como se muestra en la Figura IV.6, se favorece inicialmente la entrega de 120 unidades de producto P3 a la terminal activa inicial para evitar costos de activación. Al final de la operación $k = 1$, el "batch" B4 se encuentra a 5 unidades volumétricas de alcanzar el depósito D4, ocupadas por el "batch" B3. Por lo tanto, en las próximas tres operaciones ($k = 2$, $k = 3$ y $k = 4$) se procede a atender una parte de la demanda del depósito D5. Esta situación produce una activación del flujo en el segmento D4–D5 y un volumen activado de 135 [10^2 m^3] para despachar 70 unidades de B2, 70 de B3 y 5 de B4. La entrega del lote B4 hacia el depósito D5 tiene que ser interrumpida para poder satisfacer la demanda de 410 unidades de B4 en el depósito D4. De otro modo, el problema sería infactible debido a la condición de flujo unidireccional del líquido contenido en el poliducto. En efecto, al final de la operación $k = 4$ el volumen máximo que puede entregarse a D4 desde el lote B4 es exactamente 410 unidades. Por lo tanto, D4 se comporta como una terminal restrictiva que obliga a realizar la entrega prescrita desde el lote B4 al depósito D5 mediante 2 operaciones no–consecutivas. Así, durante la operación $k = 5$, D4 pasa a ser activa produciéndose una detención del segmento D4–D5. Luego de realizar la entrega desde el "batch" B4 al depósito D4, se procede a despachar las 152

unidades del lote B5 hacia el mismo depósito D4, durante la operación $k = 6$. A continuación se activa nuevamente el flujo en el segmento D4–D5 para derivar 135 unidades de B4 durante $k = 7$ y 248 unidades de B5 mediante la corrida $k = 8$ al depósito D5. De esta forma, el requerimiento de 140 unidades de B4 en el depósito D5 es cumplimentado mediante dos operaciones no consecutivas ($k = 4$ y $k = 7$). Finalmente, durante las últimas dos operaciones se transfieren productos a los depósitos D4 ($k = 9$) y D3 ($k = 10$). Si bien no hay más reactivaciones de flujo, se producen dos detenciones en los segmentos D4–D5 y D3–D4 (ver flechas rojas en las dos últimas líneas de la Figura IV.6)

Como resultado el volumen total detenido (SV) es igual a: $2 * (\sigma_{D5} - \sigma_{D4}) + (\sigma_{D4} - \sigma_{D3}) = 870 [10^2 \text{ m}^3]$. En el Ejemplo IV.1, la terminal activa inicial es D4 y la final es D3. Entonces, $\Delta = \sigma_{D3} - \sigma_{D4} = -600 [10^2 \text{ m}^3]$ y la igualdad $AV = SV + \Delta$ se cumple; es decir, $AV = 870 - 600 = 270$.

A modo comparativo, si se utilizara el modelo de simulación de eventos discretos presentado en el capítulo anterior y la regla que prioriza la atención de la demanda de la terminal más cercana a la actualmente abastecida (NC), se obtiene un "schedule" detallado similar al descrito en la Figura IV.6. Esta similitud estaría indicando que la secuencia óptima de terminales activas presenta un comportamiento similar al establecido por la regla de priorización NC . En cambio, cuando otras reglas de priorización se aplican para elegir la próxima terminal activa, el modelo de simulación genera soluciones sub-óptimas que presentan un volumen total activado superior al óptimo y una mayor cantidad de operaciones de "corte".

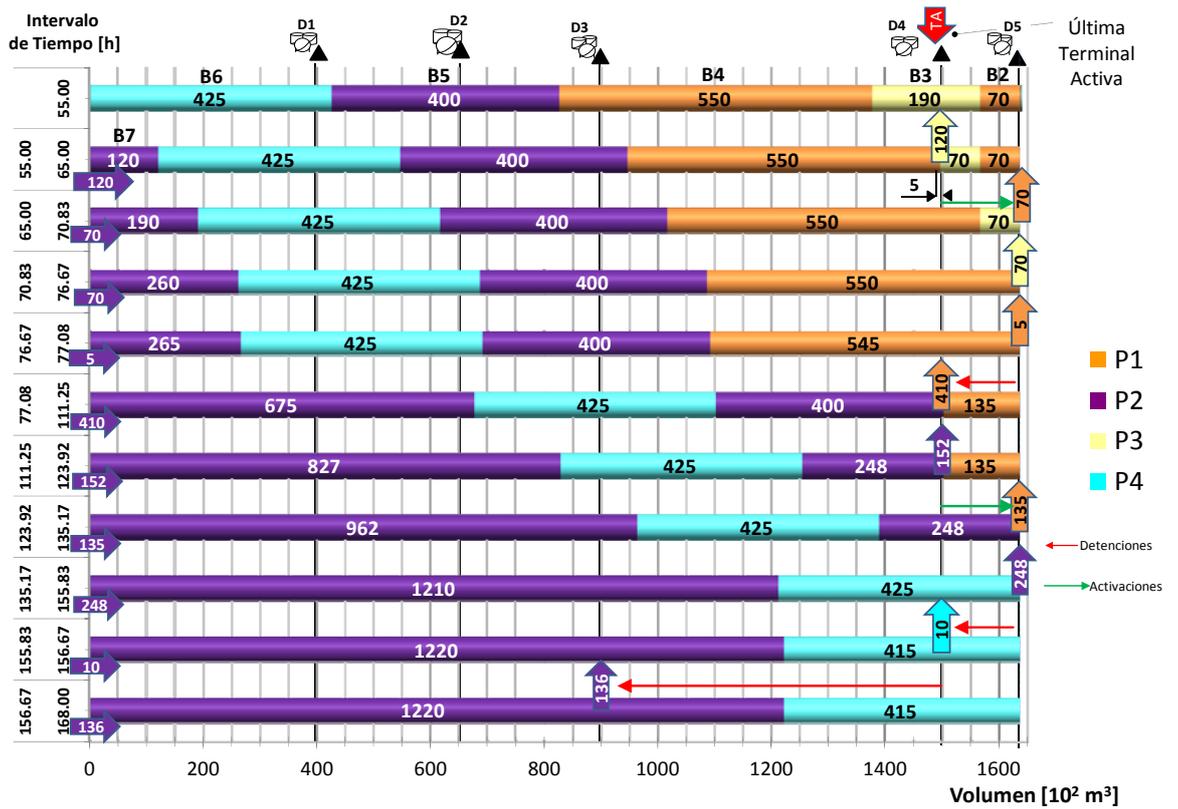


Figura IV.6. Operaciones de entregas detalladas a realizarse mientras se inyecta el lote B7

En la parte superior de la Tabla IV.2 se muestra un resumen de los resultados computacionales para el Ejemplo IV.1 que incluye la metodología de resolución empleada, el tamaño del modelo MILP usando la estrategia *ND*, el tiempo de uso de CPU y el valor del volumen activado para cada alternativa. En el caso del modelo de simulación, se muestran los resultados obtenidos con las reglas *NC*, *FF* y *NF*, respectivamente. Se observa que el modelo de simulación genera la solución óptima cuando aplica la regla *NC*.

Tabla IV.2. Resultados computacionales para los Ejemplos IV.1, IV.2 y IV.3

Ej	Metodo- logía	Opera- ciones K	Volumen Activado [10 ² m ³]	Costo Total [\$]	Gap. Opt [%]	CPU [s]	Vbles Cont.	Vbles Bin.	Ecs.	
1	MILP	ND	10	270	12700	0.0	0.33	2072	100	1180
		NC	10	270	12700	0.0	0.75	-	-	-
	Simul.	FF	12	1140	23400	84.3	0.75	-	-	-
		NF	13	1275	25750	102.8	0.75	-	-	-
2		ND	25	3475	59750	0.0	6.36	6188	216	2785
	MILP	PD	25	3475	59750	0.0	1.72*	3292 [§]	142 [§]	1784 [§]
		FD	25	3475	59750	0.0	0.64*	2072 [†]	100 [†]	1180 [†]
		NC	26	3475	60750	1.7	3.00	-	-	-
	Simul.	NF	32	5715	86650	45.0	3.00	-	-	-
		FF	31	6180	92800	55.3	3.00	-	-	-
3		ND	53	7950	132500	0.0	2261.5	18729	481	6423
	MILP	PD	53	7950	132500	0.0	108.1*	3769 [§]	222 [§]	2298 [§]
		FD	53	8800	141000	6.4	32.1*	3167 [†]	210 [†]	2044 [†]
		NC	55	7950	134500	1.5	6.00	-	-	-
	Simul.	NF	65	13645	201450	52.0	6.00	-	-	-
		FF	63	14325	206250	55.7	6.00	-	-	-

* Tiempo total de CPU (sumando todas las iteraciones)

§ Para la formulación MILP PD de mayor tamaño (Ej. IV.2: correspondiente al par B6-B7; Ej. IV.3: par B12-B13)

† Para el mayor de la formulación MILP FD de mayor tamaño (Ej. IV.2: correspondiente al "batch" B7; Ej. IV.3: "batch" B13)

IV.6.2 Ejemplo IV.2

En el Ejemplo IV.2 se trata el mismo caso de estudio referido a un poliducto con una única fuente de ingreso, cuatro productos y cinco terminales de distribución, pero ahora se amplía la longitud el horizonte de planeación a dos semanas. El programa de inyecciones en el origen del poliducto para las dos primeras semanas (ver Figura III.5) comprende cuatro lotes (B6, B7, B8 y B9) y se resume en la Tabla IV.3.

Tabla IV.3. Programa de inyecciones agregadas para el Ejemplo IV.2

"batch"	Producto	Volumen [10 ² m ³]	Tiempo de inicio [h]
B6	P4	425	5.0
B7	P2	1356	55.0
B8	P4	120	168.0
B9	P1	1235	183.0

En este caso se supone que el depósito activo al tiempo $t = 0$ es D1. Seis entregas agregadas son realizadas mientras se inyecta el "batch" B6, nueve mientras ingresa B7, una sola cuando se inserta el lote B8 y otras ocho cuando se bombea B9. El total de entregas prescriptas en el plan agregado asciende a 24. Por lo tanto, la cardinalidad del conjunto K no puede ser inferior a dicho valor. En efecto, hubo que incrementar el valor de $|K|$ a 25, porque considerando 24 operaciones la formulación MILP no tiene solución factible (ver Tabla IV.2).

El "schedule" detallado óptimo para un horizonte de planeación de dos semanas se muestra en la Figura IV.7. El mismo fue obtenido en 6.36 segundos de CPU a través de la formulación MILP aplicando el algoritmo de solución *ND* (Non-Decomposition).

Todas las entregas, excepto una de ellas, se completan a través de una sola operación simple de inyección. La única entrega que requiere un par de operaciones no consecutivas involucra la entrega de 248 unidades de producto P2 desde el lote B5 al depósito D5 mientras se inserta el "batch" B7.

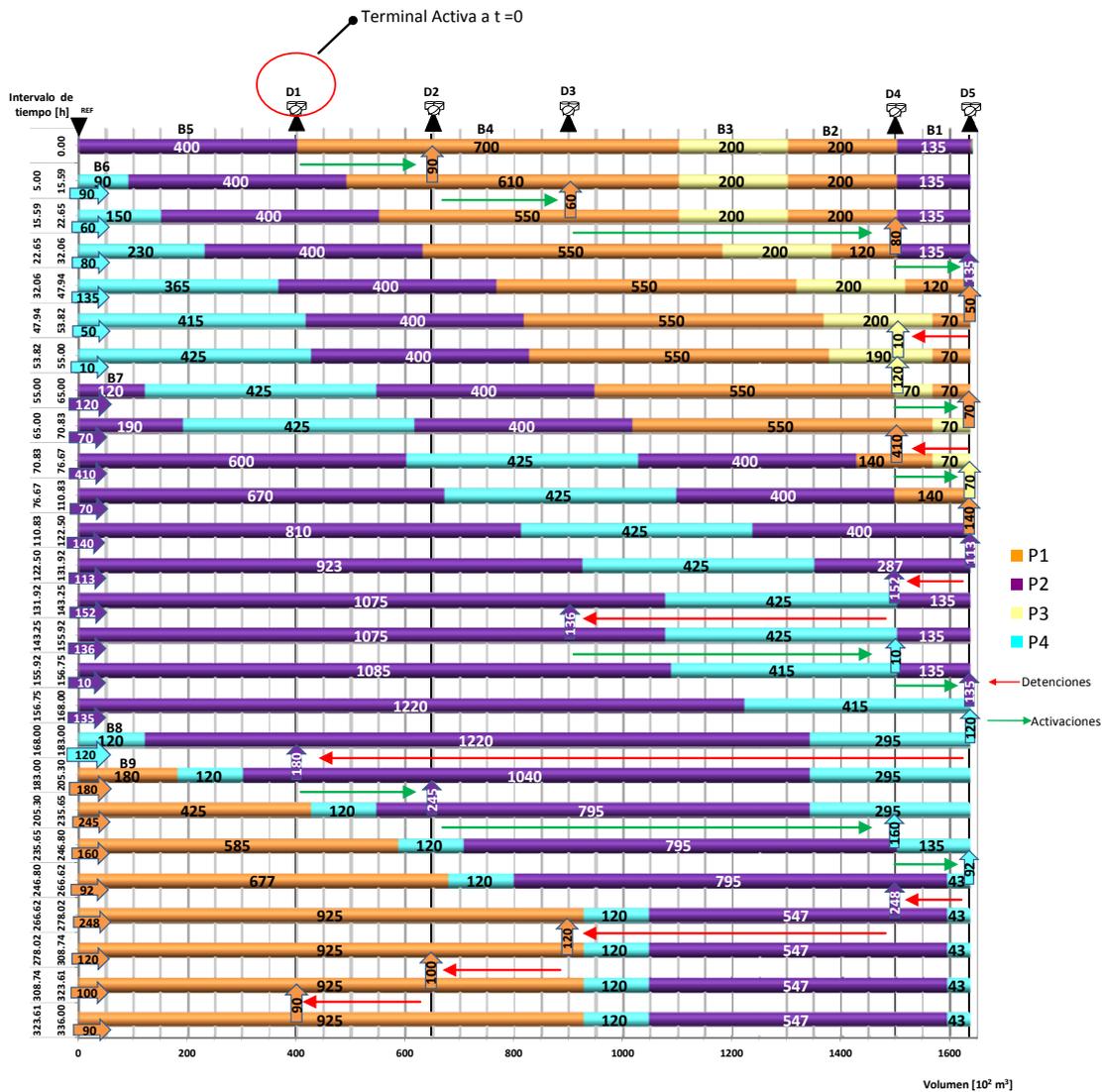


Figura IV.7. Solución óptima para el Ejemplo IV.2 usando la formulación MILP completa

Observando la Figura IV.7, la cantidad de producto P2 derivada al depósito D5 durante la operación $k = 12$ se limita a 113 unidades debido a

que la terminal D4 se vuelve restrictiva lo que obliga a concretar la entrega de P2 a la terminal D5 mediante dos operaciones no-consecutivas. Por lo tanto, se atiende primero al depósito D4, derivando 152 unidades de P2 prescriptas desde el lote B5 a dicho depósito (ver Figura III.5). Caso contrario, el problema sería infactible por la imposibilidad de cumplimentar las entregas a la terminal D4, fijadas por el plan agregado. De la Figura IV.7 (ver flechas verdes) se deduce que la solución óptima requiere la reactivación del flujo en el tramo D4-D5 cinco veces, tres veces en el segmento D3-D4 y dos veces en las secciones D2-D3 y D1-D2. Luego, $AV = 5 \cdot 135 + 3 \cdot 600 + 2 \cdot 250 + 2 \cdot 250 = 3475$ [10^2 m^3]. Más aún, el depósito D1 es la terminal activa tanto al inicio como al final del horizonte de programación. Por lo tanto, $\Delta = 0$ y $SV = AV = 3475$ [10^2 m^3] en el óptimo. Tal como se muestra en la Tabla IV.2 para el ejemplo IV.2, los algoritmos de descomposición (*FD* y *PD*) también permiten alcanzar la solución óptima de la formulación MILP del problema completo, pero a un costo computacional inferior. Es de destacar que el tiempo total de CPU decrece por un factor de 4 y de 10, respectivamente.

Analizando ahora el comportamiento del modelo de simulación de eventos discretos aplicado al mismo problema a través de los resultados mostrados en la Tabla IV.2, se observa que el mínimo volumen activado se alcanza nuevamente cuando se aplica la regla *NC* que prioriza la atención de la terminal más cercana al depósito activo en la operación previa (ver Figura IV.8). El Ejemplo IV.2 fue resuelto aplicando las tres reglas heurísticas propuestas para seleccionar la próxima terminal activa, pero la única que alcanza el mínimo valor para el volumen detenido es obviamente la regla *NC*.

Sin embargo, la solución obtenida mediante el modelo de simulación y la regla *NC* requiere una operación adicional respecto del número requerido en la solución óptima del problema. En efecto, el número de corridas detalladas ejecutadas durante la inyección del "batch" B9 crece de 8 a 9. Más aún, la secuencia de cortes durante la inyección del lote B7 difiere del adoptado en la Figura IV.7. En este caso, la entrega agregada de producto P1 desde el lote B4 al depósito D5 se completa con un par de entregas no consecutivas. En la solución óptima en cambio, se desdobra en dos operaciones la entrega de P2 desde el lote B5 a D5. Por lo tanto, se obtiene la misma secuencia de entregas hallada con el MILP para el Ejemplo IV.1 presentada en la Figura IV.6. Todas las corridas de simulación se resuelven en 3 segundos de CPU, la mitad del tiempo requerido para la formulación MILP completa. Estos resultados revelan el potencial de las herramientas de simulación de eventos discretos cuando se aplican reglas apropiadas para asignar prioridades a las terminales. En cambio, el desempeño relativo de las reglas *FF* y *NF* mejora respecto al Ejemplo IV.1, pero todavía el volumen activado supera, aproximadamente, en un 64 % y 77 % al valor óptimo. Más aún, es necesario realizar 6 ó 7 operaciones por encima del número óptimo para completar las entregas agregadas.

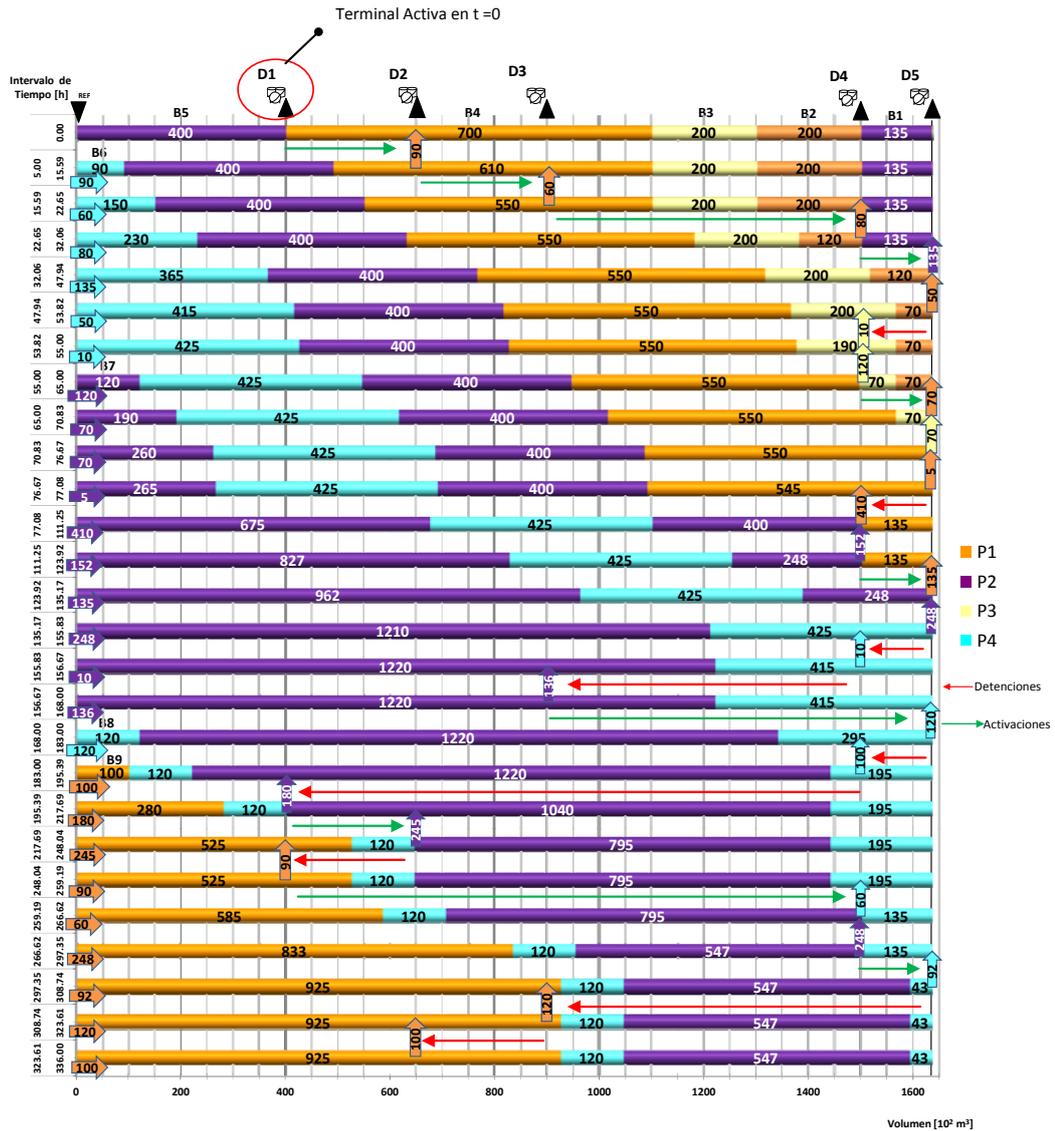


Figura IV.8. Programa detallado para el Ejemplo IV.2 usando el modelo de simulación y la regla heurística NC

Un modo distinto de mostrar la eficiencia de las soluciones obtenidas puede observarse en la Figura IV.9. La nueva representación describe, para cada una de las metodologías empleadas, el volumen reactivado, adecuadamente ponderado, en cada segmento, con el factor de ponderación igual al volumen de cada sección. Se observa que el volumen reactivado y el número de reactivaciones se incrementa a medida que la distancia entre el segmento y el origen de la tubería aumenta. El área

debajo de la curva de distribución es una medida del volumen total reactivado.

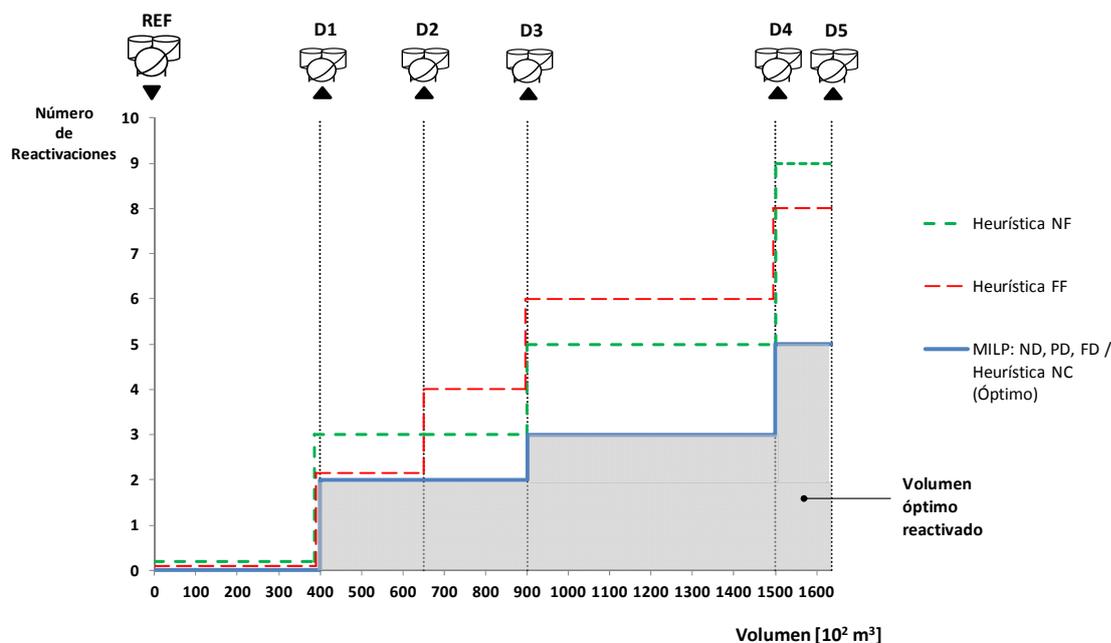


Figura IV.9. Perfil de distribución de los volúmenes reactivados en el Ejemplo IV.2

IV.6.3 Ejemplo IV.3

En el Ejemplo IV.3 se resuelve el mismo caso de estudio pero considerando el horizonte de planeación completo de 4 semanas. Comparado con el Ejemplo IV.2, el nuevo problema tendrá en cuenta la inyección de cinco lotes adicionales (B10, B11, B12, B13, y B14) en la estación de entrada, y 25 nuevas entregas agregadas (ver Tabla III.2 y Figura III.5 del capítulo anterior). Doce de las nuevas entregas tienen lugar durante la inyección del lote B13. Esto implica un total de 49 entregas agregadas e igual valor de la cota inferior para la cardinalidad del conjunto K . Sin embargo, $|K|$ tiene que elevarse a 53 para que el modelo sea factible. Como resultado, la eficiencia computacional del enfoque de optimización

usando la estrategia de resolución *ND* disminuye drásticamente y el tiempo de solución crece exponencialmente. De este modo, el Ejemplo IV.3 se presenta como un problema de referencia para apreciar las ventajas de usar algún tipo de técnica de descomposición para resolver modelos de optimización MILP de gran tamaño. No sólo los ahorros en tiempos de uso de CPU son importantes, sino también la calidad de las soluciones encontradas en términos de volumen total reactivado y número de operaciones requeridas. La Figura IV.10 muestra la solución óptima para el Ejemplo IV.3 cuando se resuelve la formulación MILP completa usando la estrategia *ND*.

Debido al incremento en el tamaño de la formulación, el tiempo de CPU se incrementa de 6.36 segundos para el Ejemplo IV.2 a 2261.5 segundos en el Ejemplo IV.3, es decir, por un factor de 355.

De la Tabla IV.2 se observa que la técnica de descomposición de a pares (*PD*) logra hallar la solución óptima pero en 108.1 segundos de tiempo de CPU; esto es, 20 veces inferior a lo requerido por la estrategia de resolución *ND*. Como en los Ejemplos IV.1 y IV.2, el enfoque de simulación utilizando la heurística *NC* que prioriza atender la terminal más cercana a la última abastecida, minimiza el valor del volumen total reactivado para el Ejemplo IV.3. Sin embargo, ese mínimo volumen activado se alcanza a expensas de utilizar un mayor número de operaciones de inyección; es decir, 55 corridas en lugar de 53. Las dos operaciones adicionales son requeridas para inyectar los lotes B9 y B11. Para ingresar el lote B11, conteniendo producto P1, el "schedule" detallado provisto por la formulación MILP con la estrategia de descomposición de a pares (*PD*), completa cada una de las entregas agregadas a través de una única operación, excepto cuando se deriva producto P1 al depósito D3 (ver líneas 2 y 5 de la Figura IV.11).

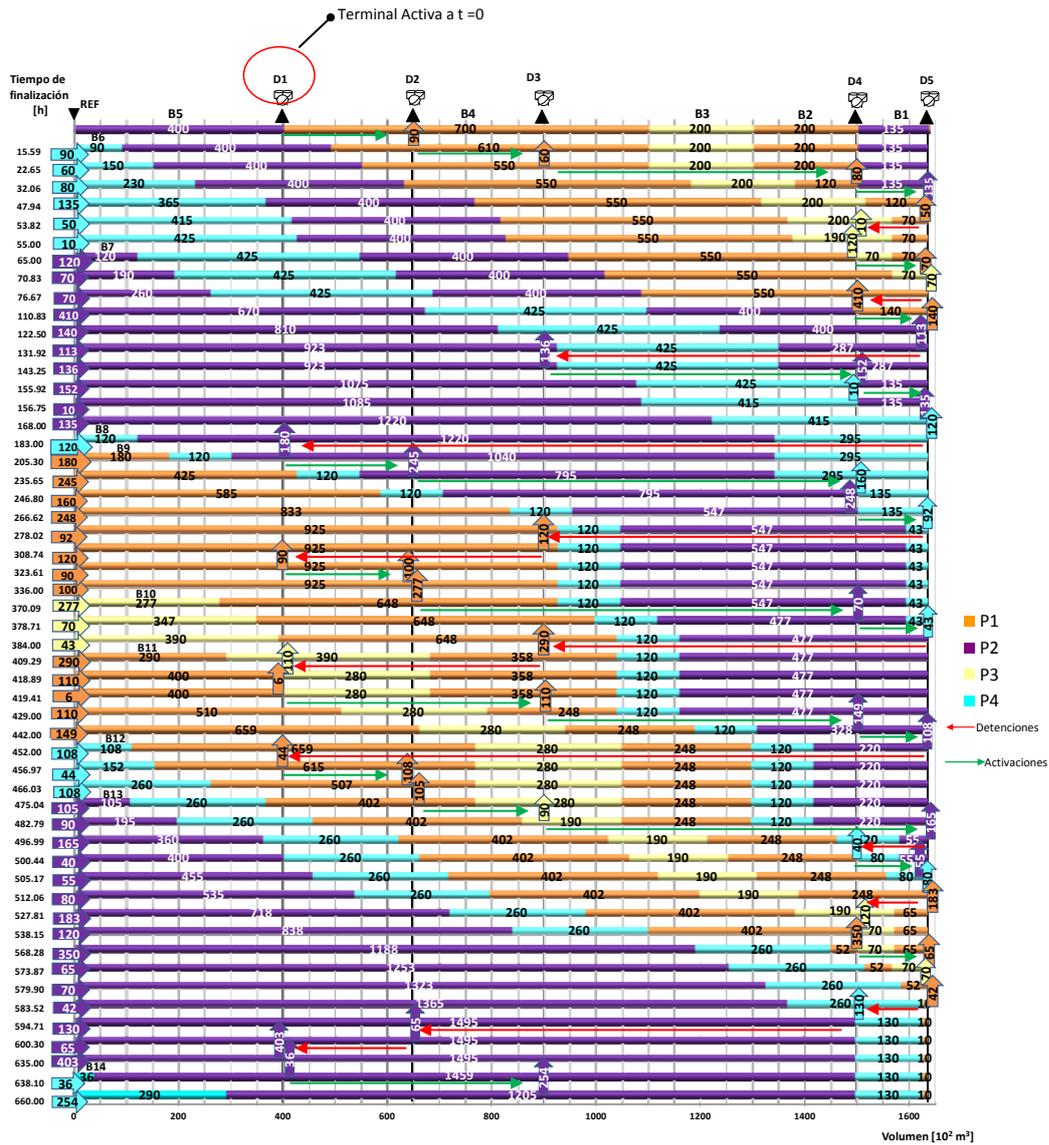


Figura IV.10. Solución óptima para el Ejemplo IV.3 resolviendo la formulación MILP completa

Contrariamente, el modelo de simulación aplicando la regla NC para la selección de terminales activos, requiere ejecutar un par de corridas para realizar: (i) la entrega de 400 unidades de P1 desde el "batch" B9 al depósito D3, y (ii) el despacho de 149 unidades de P2 requeridas por D4 desde el lote B7 (ver Figura IV.12). Sin embargo, el "schedule" detallado es obtenido en tan solo 6 segundos de tiempo de CPU.

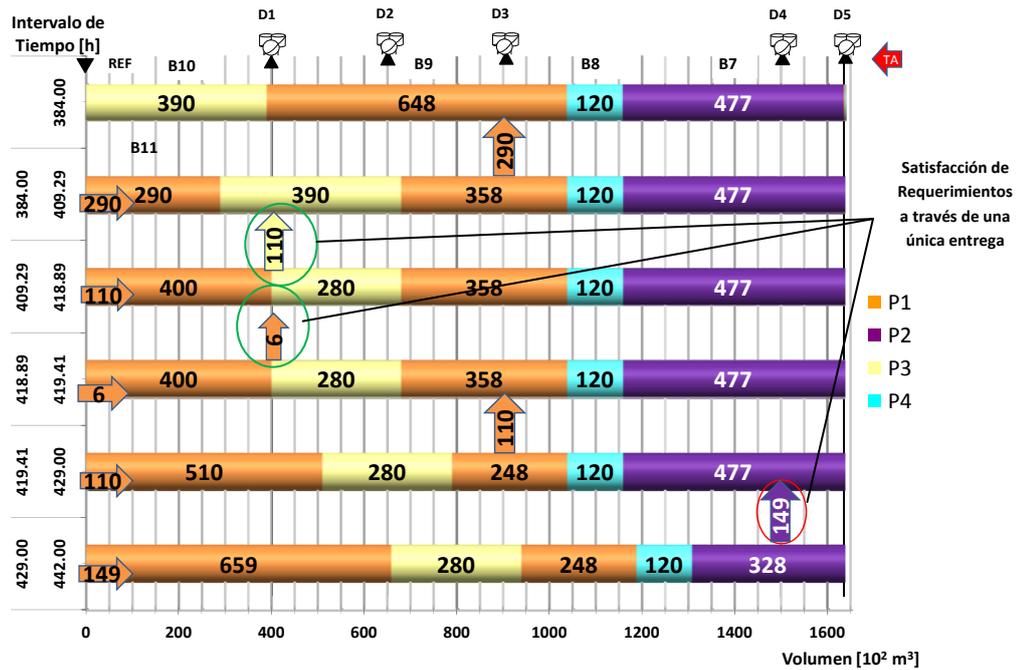


Figura IV.11. "Schedule" detallado óptimo para la inyección del "batch" B11 (Ejemplo IV.3)

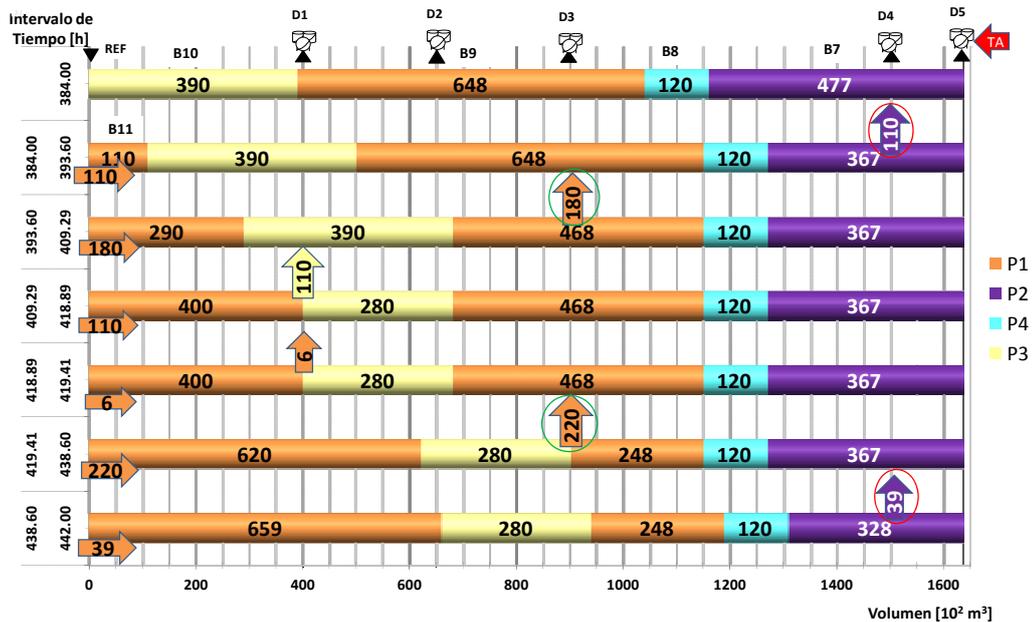


Figura IV.12. "Schedule" detallado para la inyección del lote B11 aplicando el modelo de simulación y la regla NC (Ejemplo IV.3)

En cambio, si se utiliza la heurística de descomposición total (FD) para resolver la formulación MILP del problema, se obtiene una solución factible aceptable con el mínimo número de corridas de bombeo, pero un valor del

volumen reactivado (AV) aproximadamente un 10.7 % mayor al valor óptimo. Por otra parte, las reglas heurísticas NF y FF en combinación con el modelo de simulación de eventos discretos generan soluciones subóptimas que requieren entre 10 y 12 operaciones adicionales y un volumen total activado que duplica al valor óptimo. Finalmente, los perfiles de distribución del volumen reactivado a lo largo del poliducto para las soluciones obtenidas, utilizando las herramientas de optimización y simulación de eventos discretos se describen en la Figura IV.13.

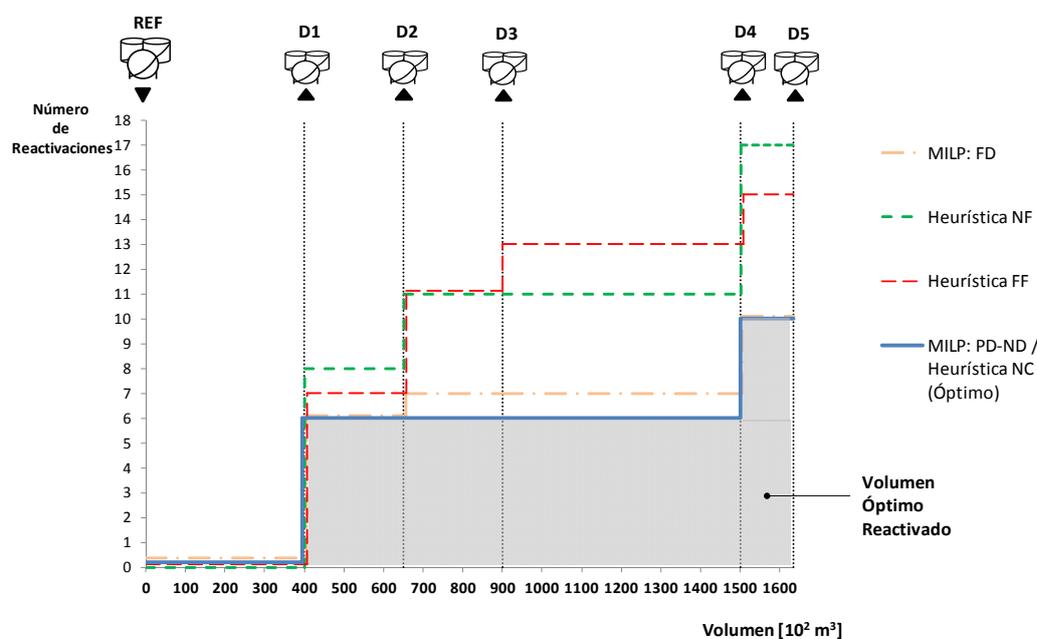


Figura IV.13. Perfil de distribución de los volúmenes reactivados en el Ejemplo IV.3

De la Tabla IV.2 se deduce que la estrategia de resolución del modelo MILP usando descomposición de a pares (PD) permite obtener soluciones efectivas en términos de costos, óptimas o cuasi-óptimas para problemas de programación detallada de poliductos de gran tamaño, con horizontes de tiempos relativamente extensos.

IV.6.4 Efecto del número de corridas sobre el costo computacional

En este apartado se pretende analizar uno de los aspectos más críticos a la hora de resolver el modelo MILP propuesto en el presente capítulo. Esto es, la determinación del valor a asignar a la cardinalidad del conjunto de operaciones ($|K|$). A tal fin, en la Tabla IV.4 se muestra un análisis completo del efecto de modificar el número de corridas $|K|$ para resolver los Ejemplos IV.2 y IV.3 utilizando la formulación MILP completa sobre el costo computacional.

Tabla IV.4. Resultados computacionales para los Ejemplos IV.2 y IV.3 usando el modelo MILP completo al variar la cardinalidad del conjunto K

Ejem- plo	Opera- ciones $ K $	Volumen Activado [10 ² m ³]	Costo Total [\$]	Gap Opt. [%]	Tiempo de CPU [s]	Vbles Cont.	Vbles Bin.	Ecs.
	24	infactible	-	-	0.01	5940	206	2669
IV.2	25	3475	59750*	0.0	6.36	6188	216	2785
	26	3475	59750*	0.0	12.92	6436	226	2901
	49	infactible	-	-	4.10	17302	438	5898
	50	infactible	-	-	7.41	17650	448	6014
IV.3	51	infactible	-	-	28.81	18001	453	6117
	52	8085	132850	0.3	1669.1	18381	471	6307
	53	7950	132500*	0.0	2261.5	18729	481	6423
	54	7950	132500*	0.0	29931.5	19093	495	6576

*Costo Óptimo

Para el Ejemplo IV.2, el valor de $|K|$ se fija inicialmente en 24, teniendo en cuenta el número total de entregas agregadas. Sin embargo, el modelo

matemático completo es infactible por lo que $|K|$ se incrementa en una unidad. Así, el nuevo número de operaciones $|K| = 25$ es lo suficientemente grande como para hallar una solución factible con un costo total de \$ 59750 en 6.36 segundos. Al mismo tiempo, el número de variables y restricciones crece ligeramente. Para verificar si la solución hallada es óptima, el valor de $|K|$ se aumenta a 26. Se resuelve una nueva instancia de la formulación MILP completa hallando el óptimo en 12.92 segundos. Si bien la resolución lleva el doble de tiempo, la solución hallada presenta el mismo costo: \$ 59750. Más aún, una de las corridas propuestas nunca se ejecuta. Dicho de otro modo, existe una operación ficticia. Por lo tanto, se considera que el mejor "schedule" detallado ha sido encontrado con $|K| = 25$.

Un análisis similar se realiza para el Ejemplo IV.3 que requiere completar las 49 entregas prescriptas en el plan agregado. Las instancias de la formulación MILP completa para $|K| = 49$, $|K| = 50$, y $|K| = 51$ resultan ser todas infactibles, pero el tiempo de CPU requerido hasta que se reporta la infactibilidad crece 7 veces cuando $|K|$ pasa de 49 a 51. Cuando $|K|$ se aumenta a 52 operaciones, se encuentra una solución factible con un costo total de \$ 132850 utilizando un tiempo total de CPU 58 veces más alto. Para verificar si la solución hallada es óptima se realiza una nueva corrida de la formulación MILP con $|K| = 53$. En esta oportunidad, se obtiene una mejor solución factible con un costo total de \$ 132500 en 2261.5 segundos. Incrementando una vez más $|K|$ a 54, se obtiene la misma solución mostrando una operación ficticia en el óptimo. Por lo tanto, el mejor "schedule" detallado para el Ejemplo IV.3 ha sido hallado con $|K| = 53$. Cuando se propone $|K| = 54$, el tiempo de resolución crece por un factor de 13, a 29931.5 segundos.

De estos resultados se observa claramente el potencial del algoritmo de descomposición de a pares (*PD*) a través del cual se encuentra la solución óptima para el Ejemplo IV.3 en tan sólo 108.1 segundos.

IV.7. CONCLUSIONES PRELIMINARES

En el presente capítulo se desarrolló una metodología rigurosa basada en un modelo matemático de programación lineal mixta entera (MILP). Dicha técnica tiene como objetivo hallar el plan detallado de entregas para configuraciones de poliductos con una única fuente y múltiples destinos. El tamaño de la formulación matemática puede aumentar considerablemente tanto con la longitud del horizonte de planificación a considerar como con el número de inyecciones programadas en el plan agregado. En tal sentido, para afrontar problemas de escala significativa, se proponen diferentes estrategias de solución basadas en técnicas de descomposición a través de las cuales se resuelve una secuencia de modelos MILP de menor tamaño a costos computacionales inferiores. Dichas técnicas se basan en el hecho empírico de considerar que el efecto de una decisión de entrega concerniente a la inyección de un lote, está vinculada tan sólo a la siguiente corrida. Entre las estrategias presentadas, la llamada estrategia de descomposición de a pares (*PD*) demuestra ser una técnica fiable para obtener el programa detallado de entregas en tiempos computacionales razonables, incluso para problemas de gran tamaño.

En resumen, hasta el momento se han propuesto dos enfoques alternativos para generar el "schedule" detallado de operaciones para un poliducto de una sola entrada y múltiples salidas: (i) por un lado, un procedimiento heurístico basado en un modelo de simulación de eventos discretos, que se combina con diversas técnicas heurísticas para seleccionar

la secuencia de terminales receptoras; (ii) por otro lado, una metodología rigurosa basada en un modelo matemático MILP resuelto a través de distintas técnicas de descomposición para abordar problemas de mayor tamaño.

Particularmente, la técnica de descomposición de a pares (PD) aplicada para resolver la formulación MILP correspondiente a un caso de estudio real encuentra el óptimo global en aproximadamente 100 segundos de tiempo de CPU, mientras que el modelo de simulación en combinación con a la regla heurística "NC" que prioriza la atención de la terminal más cercana a la última abastecida, provee una solución cercana a la óptima, con un valor tan sólo 1.57 % mayor que el costo óptimo, en sólo 6 segundos de tiempo de CPU.

Ambas herramientas suponen que el plan agregado se encuentra disponible y que ha sido resuelto a través de una formulación matemática de tipo continua en tiempo y volumen, similar a la propuesta por los autores D.C. Cafaro y J. Cerdá en su trabajo de 2008. El plan agregado consiste en una secuencia de lotes de productos a inyectar en el origen y un conjunto de entregas desde lotes en tránsito a depósitos sin especificar la manera de llevar a cabo las entregas de productos durante cada inyección. Sin embargo, el operador del poliducto necesita conocer el detalle del programa a través del cual realizará las entregas, cada una transfiriendo una cierta cantidad de producto desde un único lote a una única terminal. En tal sentido, el "schedule" detallado tiene como objetivo principal brindar toda la información necesaria a nivel de operaciones de inyección y de entregas para dar cumplimiento al plan agregado con un menor consumo de energía y costos de mantenimiento de las bombas impulsoras. Dicha meta puede lograrse minimizando tanto el volumen total de segmentos

reactivados como el número de operaciones detalladas a realizar por el operador del poliducto.

En el próximo capítulo de la tesis, se extenderá la formulación MILP a una configuración de poliductos con una única fuente y múltiples terminales, pero permitiendo entregas simultáneas mientras se realiza una operación de entrada. Dicho de otra manera, se podrá abastecer a más de una terminal por vez, durante una misma operación de corte. Este nuevo modelo permitirá considerar la selección de caudales en los diferentes segmentos del poliducto, a través un enfoque riguroso de representación basado en una escala continua de tiempo y volumen. Siempre el objetivo será obtener el programa detallado de operaciones que cumplimente el plan agregado, generado en una etapa de planificación previa, a un mínimo costo total.

Capítulo V

PROGRAMACIÓN DETALLADA CON ENTREGAS SIMULTÁNEAS

Modelado Matemático

V.1. INTRODUCCIÓN

La planeación de las operaciones en poliductos es un problema industrial de gran interés. En la práctica, los operadores de poliductos definen las operaciones de corte y derivación de lotes, los tipos de combustibles inyectados y transferidos, y las cantidades asignadas a las terminales de recepción en cada corte. En su afán de ejecutar el programa de descargas de la manera más eficiente, muy a menudo, los operadores realizan derivaciones a más de una terminal durante una misma operación de corte para abaratar costos de operación y mantenimiento. A este tipo de operaciones de entregas se las denomina "entregas simultáneas ó al paso". Durante una operación de corte, un único producto puede ser inyectado en el origen del poliducto, y cada terminal activa puede recibir material de un solo lote fuente. Sin embargo, dos ó más terminales activas pueden compartir el mismo lote fuente. El objetivo de permitir entregas en

simultáneo apunta principalmente a reducir la cantidad de detenciones y activaciones del flujo en los segmentos de la tubería a realizar para implementar el plan agregado propuesto.

En los capítulos anteriores, al igual que en la mayoría de las contribuciones disponibles en la literatura, se supone que las entregas de productos a terminales pueden realizarse de a una por vez. Es decir, se plantea como hipótesis que una y sólo una terminal puede ser atendida durante una operación de corte. En cambio, a lo largo de este capítulo, dicha hipótesis se relajará dando lugar a la generación de un nuevo modelo de programación lineal mixta entera (MILP) de tipo continuo. Resolviendo este modelo, se obtendrá el programa detallado de entregas en poliductos con una única fuente y múltiples destinos, que podrá incluir entregas simultáneas a diferentes terminales durante una misma operación de inyección. Se busca así minimizar los costos de encendido de bombas ocasionados por la reactivación del flujo en segmentos donde el fluido permaneció estático en la operación previa, utilizando el mínimo número de operaciones posibles para implementar las entregas a terminales prescriptas en el plan agregado.

El modelo propuesto en el presente capítulo, puede manejar un rango de caudales diferente para cada segmento de la tubería y ajustar el tamaño de las descargas hacia las terminales para mantener el flujo dentro del rango admisible. Para evaluar la eficiencia del plan detallado, tanto en términos de costos de operación como en tiempos de CPU, se resuelven dos ejemplos y se comparan los resultados con los obtenidos en las dos contribuciones anteriores.

V.2. EJEMPLO MOTIVADOR

En la Figura V.1 se muestra el plan agregado de operaciones propuesto para un poliducto con una estación de entrada y tres terminales de distribución que transporta 4 productos derivados del petróleo. En la primera línea se puede observar la ubicación de cada lote de producto en el poliducto al inicio del horizonte de tiempo. La segunda línea ilustra el estado del poliducto luego de completar la inyección del lote B5 conteniendo producto P2 a la hora $t= 7.00$ h. Mientras se bombean las 350 unidades de P2 en el lote B5 desde el origen, el planificador del poliducto tiene que llevar a cabo el conjunto de entregas prescritas en el plan agregado. Pueden denominarse entregas "agregadas" debido a que el cumplimiento de algunas de ellas puede requerir la ejecución de dos o más operaciones detalladas de entrega o "cortes". Las derivaciones "agregadas" están representadas con flechas verticales en la segunda línea de la Figura V.1. De hecho, existen diversas maneras de lograr el cumplimiento de tales entregas "agregadas". Una alternativa para poliductos con una única fuente es atender una única terminal por vez (ó sea mediante entregas simples), tal como se propone en los capítulos anteriores. Dicho de otra manera, la inyección de un lote dentro del poliducto se lleva a cabo a través de una secuencia de corridas detalladas de bombeo u operaciones de "corte", donde cada corte involucra transferir un flujo de producto desde un único lote a una única terminal de destino. Se favorece una secuencia de entregas simples que minimice el costo del volumen total reactivado. La mejor programación detallada de operaciones de corte obtenida para cumplimentar las entregas "agregadas" durante la inyección del lote B5 a mínimo costo total de activación del flujo en segmentos del poliducto se muestra en la Figura V.2.

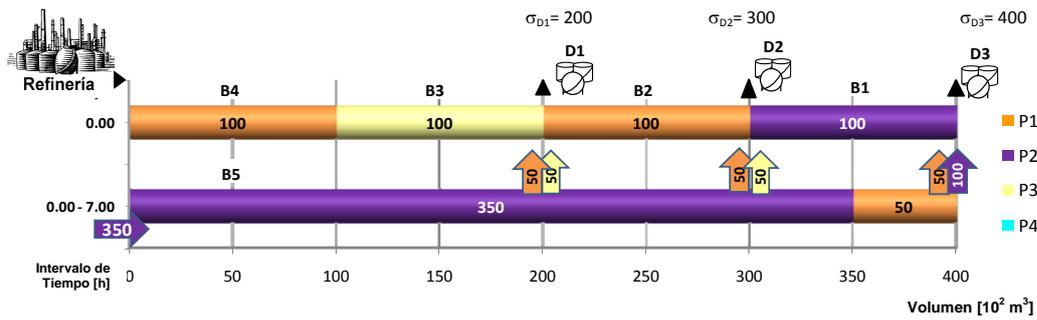


Figura V.1. Programa agregado para el ejemplo motivador

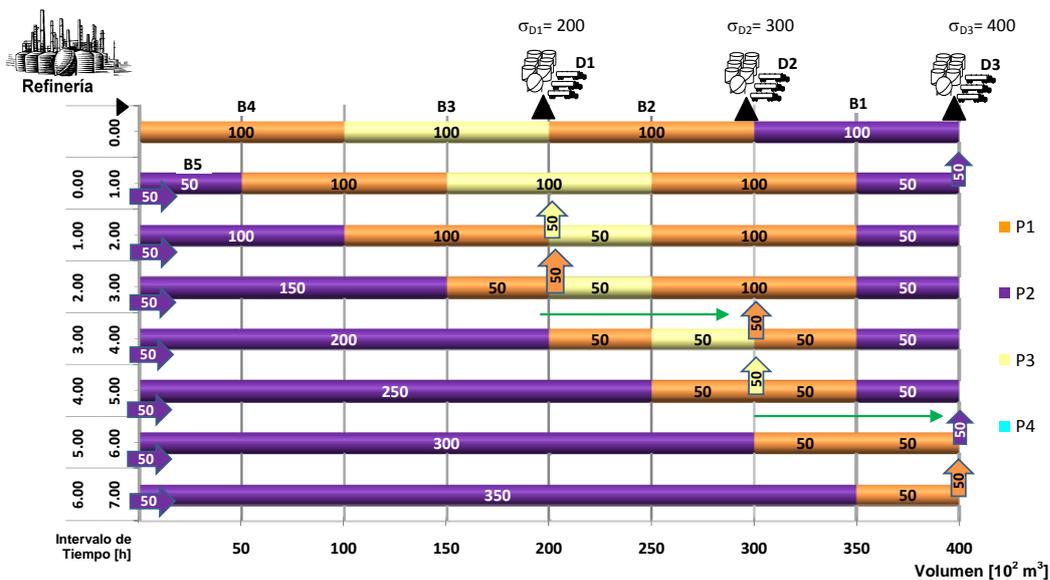


Figura V.2. Programa detallado para el ejemplo motivador permitiendo solo entregas simples

La inyección del lote B5 se descompone en una secuencia de siete operaciones de corte, cada una entregando producto desde un único lote a una única terminal. Es decir, mientras se inyecta el lote B5, se llevan a cabo siete operaciones para cumplimentar las seis entregas agregadas planificadas. Únicamente la entrega "agregada" de 100 unidades de P2 desde el lote B1 a la terminal D3 requiere un par de cortes no consecutivos. En el primero de ellos que se extiende de $t=0$ a $t=1$, se entregan las primeras 50 unidades de P2 y recién durante el intervalo 5.0 – 6.0 h, se

cumplimenta la cantidad total de lote B1 a entregar a la terminal D3 (ver líneas 2 y 7 de la Figura V.2).

Supongamos que la última terminal activa al inicio del horizonte fue la terminal D3. Analizando las reactivaciones del flujo en secciones del poliducto, se observa que los segmentos D1-D2 y D2-D3 se activan una vez cada uno debido a que la ubicación del despacho cambia del depósito D1 al D2 y desde D2 a D3, respectivamente (ver flechas verdes horizontales en las líneas 5 y 7 de la Figura V.2). El flujo reactivado pone en movimiento 200 unidades (en 10^2 m^3).

Otro punto importante de destacar es que el caudal permanece constante al nivel máximo de 50 unidades por hora a lo largo de la tubería durante todo el horizonte de tiempo. Mientras transcurre una operación, el flujo se dirige hacia una única terminal a velocidad máxima y los lotes en los segmentos ubicados aguas abajo del depósito abastecido, permanecen detenidos.

Se intentará ahora mejorar la solución obtenida resolviendo nuevamente el ejemplo, pero esta vez permitiendo la ejecución de entregas de productos a más de una terminal al mismo tiempo durante una operación de corte múltiple. Dicho de otra manera, será permitida la entrega simultánea de uno o más productos a más de un destino durante una misma operación de corte. Sin embargo, una terminal sólo podrá recibir producto desde un único lote fuente mientras se inyecta un solo tipo de combustible en el origen del poliducto. La Figura V.3 muestra el nuevo programa alternativo que se genera.

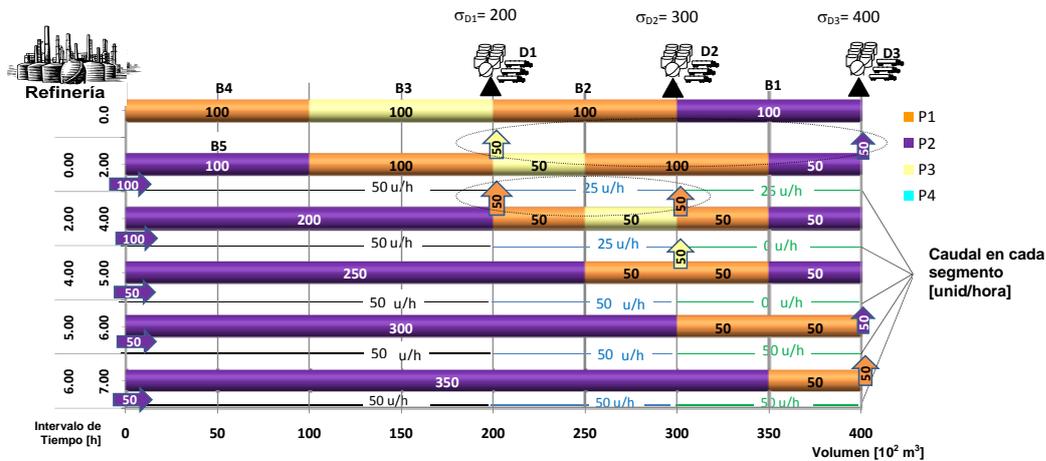


Figura V.3. Programación detallada para el ejemplo motivador, permitiendo entregas simultáneas

Con el nuevo programa detallado, se efectúan cinco operaciones de corte múltiple, con las primeras dos realizando entregas simultáneas a un par de terminales desde dos diferentes lotes en tránsito (ver líneas 2 y 3 de la Figura V.3). La inyección del lote B5 requiere la ejecución de cinco operaciones de corte consecutivas. Más aún, se lleva a cabo sólo una activación en el segmento D2–D3 al tiempo $t=5$ h.

En contraste con la solución que admite sólo entregas simples, el segmento D1–D2 se mantiene activo continuamente a través de la realización de entregas simultáneas a múltiples depósitos en algunas operaciones. De este modo, ninguna reactivación de los segmentos Ref–D1 y D1–D2 resulta necesaria. Como resultado, la programación detallada de operaciones de corte con entregas múltiples requiere la activación de sólo 100 unidades de volumen correspondiente al segmento D2–D3, al tiempo $t=5$ h. Comparado con el programa detallado óptimo cuando sólo se admiten despachos simples, el volumen puesto en movimiento durante el horizonte de planeación se reduce a la mitad y el número de operaciones

baja de 7 a 5. Para lograr dichas mejoras se efectuaron algunos cambios operacionales. En la línea 2 de la Figura V.3 se observa que los lotes B3 y B1 son entregados en forma simultánea hacia las terminales D1 y D3, respectivamente. Debido a que el depósito D1 es un punto de recepción activo, entre el origen y la terminal activa más alejada (D3), la velocidad del flujo aguas abajo de D1 es más lenta que aguas arriba. Por tal motivo, si se realizan entregas intermedias, existirá una variación del caudal del flujo a lo largo de la tubería. Tal como muestra la Figura V.3, el caudal a través de un segmento "j" (que conecta los depósitos "j-1" y "j") durante una operación detallada se puede computar a través de la sumatoria de todas las derivaciones de productos hacia las terminales $j' \geq j$ y dividiendo dicho valor por la duración de la operación.

Para la primera corrida (ver la línea 2 de la Figura V.3) el caudal a través del tramo Refinería-D1 es de 50 unidades/hora. Se calcula dividiendo el volumen total derivado (100 unidades) por la duración (2 h).

Para el segmento D1-D3, el caudal se reduce a 25 unidades/h, porque sólo la mitad del lote B3 continua moviéndose aguas abajo de D1, despachando 50 unidades de B1 al depósito D3. El flujo en las secciones de la tubería ubicadas aguas abajo de la terminal activa D1 ha disminuido por la entrega de producto P3 a D1.

En la segunda corrida (línea 3 de la Figura V.3) el flujo tiene lugar a diferentes velocidades en cada segmento de la tubería: 50 unidades/h en el tramo Refinería-D1, 25 unidades/h en D1-D2 y 0 unidades/h (flujo detenido) en el segmento D2-D3. Una de las características más interesantes del enfoque propuesto para el desarrollo de programas detallados de operaciones con entregas múltiples, es la capacidad de manejar diferentes velocidades del flujo en cada segmento de la tubería.

Los autores Mienser, T.O. y Leffler, W.L. en su libro "Oil & Gas Pipelines in Nontechnical Language" del año 2006, afirman que cuando se realiza una sola entrega a un único depósito, el caudal se desarrolla a la máxima presión posible en la única terminal receptora y esto podría causar algún daño al tanque de almacenamiento o bien, producir explosiones. Dichos inconvenientes se pueden evitar si se logra reducir el caudal del flujo en los segmentos más alejados, para lo cual se pueden programar derivaciones parciales en los depósitos ubicados aguas arriba de la tubería. Esta es otra ventaja de las operaciones de cortes múltiples. Adicionalmente, en cada depósito intermedio se coloca una válvula de control para reducir el flujo que se dirige hacia la terminal receptora. En cuánto se debe reducir el caudal de flujo, depende de la cantidad destinada a dicha terminal.

V.3. HIPÓTESIS DEL PROBLEMA

Antes de plantear la nueva formulación matemática, es necesario listar las hipótesis a considerar en el modelo para obtener el "scheduling" detallado de operaciones en poliductos con una única estación de ingreso y múltiples terminales de salida, cuando se permite realizar entregas de productos a más de una terminal durante una misma operación de inyección.

- (a) Se considera un poliducto multi-producto con una única fuente y varias terminales de distribución.
- (b) Los combustibles transportados son líquidos incompresibles.
- (c) Se dispone de un plan factible agregado de las operaciones de entrada/salida del poliducto, hallado a través de un enfoque de tiempo continuo publicado por los autores Cafaro y Cerdá (2004; 2008).

- (d) Se permiten entregas simultáneas, desde varios lotes en tránsito a múltiples terminales de recepción mientras se ejecuta una corrida de bombeo de un producto en el origen del poliducto. Es decir, puede haber más de una terminal activa durante un mismo intervalo de tiempo.
- (e) Ninguna de las entregas efectuadas en simultáneo puede retrasar su inicio ni ser interrumpida antes que se complete la operación de corte. Es decir, las válvulas de admisión de los tanques receptores en las terminales activas permanecerán abiertas desde el inicio hasta el final de la operación de corte. Por lo tanto, el flujo en cada segmento del poliducto se mantiene a la misma velocidad durante toda la operación.
- (f) Durante una operación de corte, cada terminal activa puede recibir producto desde un único lote.
- (g) El rango del caudal admisible en cada segmento varía con el diámetro de la tubería y las características operativas de bombas y válvulas. Así, se establecerá un rango de caudal permitido para cada segmento del poliducto.
- (h) Los costos de consumo de energía y de mantenimiento de las bombas impulsoras están directamente relacionados tanto con el número ponderado de reactivaciones del flujo en los distintos segmentos del poliducto, como también con el número de veces que se encienden y se apagan las bombas de conmutación.

En la siguiente sección se presenta un modelo de optimización riguroso para resolver el problema de programación detallada de operaciones de corte teniendo en cuenta las hipótesis antes planteadas.

V.4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La formulación matemática introducida en el capítulo anterior para hallar el "scheduling" detallado de operaciones de corte en poliductos con una única fuente y múltiples terminales de distribución dónde sólo se permiten entregas simples, se generaliza para admitir también entregas simultáneas a múltiples terminales durante un misma corrida detallada de bombeo. En el proceso de desagregación del plan maestro ó agregado del poliducto, cada inyección de un lote de producto se descompone en una secuencia de pequeñas corridas de bombeo más cortas u operaciones de corte, cada una de las cuales tiene asociado un conjunto de estados de las válvulas de acceso a tanques de terminales diferentes. En particular, siempre el estado de alguna válvula de acceso al poliducto ó al tanque de alguna terminal de distribución cambia al pasar de una operación de corte a la siguiente. El plan agregado, obtenido a través de un programa matemático mixto entero (MILP) de tiempo continuo propuesto por Cafaro y Cerdá (2004; 2008), brinda toda la información necesaria para plantear el problema de programación detallada. Esa información incluye:

- (a) la secuencia de nuevos lotes conteniendo productos refinados a inyectar durante el horizonte de planeación actual, $I^{new} = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$;
- (b) el producto que contiene cada lote $\{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}\}$;
- (c) el volumen original ó inicial de cada nuevo lote $i' \in I^{new}$, dado por $qq_{i'}$;
- (d) el subconjunto de terminales $J_{i,i'} \subseteq J$ que reciben producto desde el lote $i \in I$ durante la inyección de $i' \in I^{new}$ ($i' \geq i$);
- (e) la cantidad de producto a ser transferida desde el lote $i \in I$ al depósito $j \in J_{i,i'}$ mientras se inyecta el lote $i' \in I^{new}$, ($i' \geq i$);

- (f) el tiempo de inicio (st_i) y finalización (ft_i) de la corrida de bombeo del lote $i' \in I^{new}$;
- (g) el rango de caudal permitido para cada segmento j , $[vb_{\min}^{(j)}; vb_{\max}^{(j)}]$;
- (h) la secuencia de lotes "viejos" que residen inicialmente en la tubería, $i \in I^{old}$;
- (i) el tamaño inicial wo_i de cada lote "viejo" $i \in I^{old}$;
- (j) la coordenada volumétrica σ_j de cada terminal $j \in J$ referida al origen;
- y
- (k) el volumen total del poliducto ρv , que coincide con la coordenada de la terminal más alejada del origen del poliducto.

La Figura V.4 muestra la definición de los segmentos de un poliducto multi-producto típico compuesto por una única fuente en el origen y J terminales de distribución: D_1, D_2, \dots, D_J .

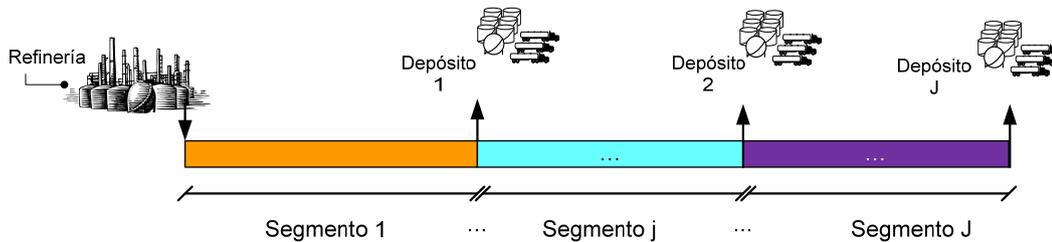


Figura V.4. Depósitos y segmentos de un poliducto con una única fuente

V.4.1 Conjuntos y variables del problema

Para formular el modelo de "scheduling" detallado de un poliducto con entregas simultáneas, se define el conjunto ordenado de operaciones de corte, $K = K_{i1} \cup K_{i2} \cup \dots \cup K_{in}$ donde el lote $i1$ precede a $i2$, el lote $i2$ precede al lote $i3$ y así sucesivamente, K_i representa la secuencia de operaciones a ejecutar durante la corrida de bombeo del lote i . Dicho conjunto representa

una estimación de la secuencia de operaciones desagregadas que se llevarán a cabo a lo largo del horizonte de planeación. Desde el punto de vista cronológico, la operación $(k - 1) \in K$ precede inmediatamente a la operación k . Más aún, se dice que el elemento $k \in K$ es una corrida ficticia si nunca se ejecuta.

El otro conjunto importante a considerar es la secuencia de lotes nuevos $i' \in I^{new}$ que serán inyectados en la tubería. Dado que la cardinalidad de cada subconjunto $K_{i'}$ no puede conocerse de antemano, una estimación conservativa de $|K_{i'}|$ está dada por el número de entregas agregadas durante la inyección del lote i' prescripta en el plan maestro; es decir, $|K_{i'}| \approx \sum_{i \leq i'} |J_{i,i'}|$. Debido a que se permiten entregas múltiples durante una operación de corte k , es común que el número de operaciones relacionadas con la inyección del lote i' sea menor que $\sum_{i \leq i'} |J_{i,i'}|$ en el óptimo.

Adicionalmente, se definen las siguientes variables de tipo binaria y de tipo continua:

Variables binarias

u_k indica la existencia de la operación k ;

$x_{i,j}^{(k)}$ denota que la operación de entrega de una porción del lote i hacia el depósito j durante la operación k se ejecuta cuando $x_{i,j}^{(k)} = 1$;

$v_j^{(k)}$ indica que el segmento j (que conecta las terminales $j - 1$ y j) está activo durante la corrida k ; cuando $v_j^{(k)} = 1$.

Variables continuas

Q_k volumen de producto inyectado en la línea durante la operación de corte k ;

L_k duración de la operación detallada k ;

C_k tiempo de finalización de la operación detallada k ;

$D_{i,j}^{(k)}$ volumen que se extrae del lote i para derivarlo al depósito j durante la ejecución de la corrida k ;

$W_i^{(k)}$ volumen del "batch" i al tiempo de finalización de la operación detallada k ;

$F_i^{(k)}$ coordenada frontal del "batch" i al tiempo C_k ;

FAT_k volumen activo (en movimiento) durante la corrida k ;

AV_k volumen total reactivado durante la corrida k ;

SV_k volumen total detenido al inicio de la operación k , denotando los segmentos del poliducto donde el flujo se detiene durante la corrida k .

Las variables continuas AV_k y SV_k se incorporan al modelo para medir la calidad de la programación detallada obtenida. Como se permiten entregas simultáneas, es necesario identificar la terminal más lejana que recibe producto durante cada corrida k para establecer el volumen total activo (FAT_k) durante la operación k . De esa forma, FAT_k se puede calcular fácilmente. Más aún, el incremento o la reducción del volumen activo durante dos corridas sucesivas (apagado o encendido de las estaciones de bombeo) se determina en base a los valores de FAT_{k-1} y FAT_k .

V.4.2 Restricciones del modelo

Se consideran cuatro tipos de restricciones:

(1) restricciones vinculadas a las operaciones detalladas de entrada (duración, sincronización, volumen inyectado);

(2) restricciones relacionadas al seguimiento de la posición y el contenido de los lotes en tránsito a través de la tubería durante el horizonte de tiempo;

(3) restricciones para controlar la factibilidad de las entregas de producto durante cada operación no ficticia; y

(4) restricciones para medir la performance del programa de entregas generado, a través del volumen reactivado/detenido en cada operación.

V.4.2.1 Restricciones en las corridas de inyección $C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall k \in K$

Secuenciación de las operaciones de entrada. La corrida detallada de bombeo k puede iniciarse sólo si la operación previa ($k - 1$) ha finalizado.

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall k \in K \quad (V.1)$$

Tiempo de inicio de la primera operación del conjunto $K_{i'}$ mientras se inyecta el lote i' . La primera operación detallada relacionada con la inyección del nuevo lote $i' \in I^{new}$ no puede comenzar antes del tiempo de inicio $st_{i'}$, especificado en el plan agregado para la inyección del lote i' .

$$C_k - L_k \geq st_{i'} \quad \forall i' \in I^{new}, k = first(K_{i'}) \quad (V.2)$$

Tiempo de culminación de la última operación detallada $k \in K_{i'}$. La última operación del conjunto $K_{i'}$ no puede finalizar después del tiempo de culminación ($ft_{i'}$) de la corrida de inyección del lote $i' \in I^{new}$, especificado en el nivel agregado.

$$C_k \leq ft_{i'} \quad \forall i' \in I^{new}, k = last(K_{i'}) \quad (V.3)$$

Tamaño y duración de la corrida k . Supongamos que la operación k fue planificada para inyectar una porción del lote i' dentro de la línea (es decir, $k \in K_{i'}$). Si $u_k = 0$, la operación k nunca se lleva a cabo; por lo tanto, su duración es nula ($L_k = 0$) y el volumen inyectado también ($Q_k = 0$). En otras palabras, k es un elemento ficticio del conjunto $K_{i'}$. Caso contrario, la

duración de la corrida es finita y su valor debe pertenecer al rango admisible $[l_{\min} ; l_{\max}^{(i)}]$. El parámetro l_{\min} es un valor muy pequeño mientras

que el límite superior $l_{\max}^{(i)}$ está dado por $l_{\max}^{(i)} = \max_{\substack{i \leq i' \\ j \in J_{i,i'}}} \left\{ \frac{dd_{i,j}^{(i')}}{vb_{\min}^{(j)}} \right\}$. Dichos límites

en el valor de L_k están definidos por la restricción (V.4):

$$l_{\min} u_k \leq L_k \leq l_{\max}^{(i')} u_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (V.4)$$

El límite superior $l_{\max}^{(i')}$ tiene en cuenta todas las entregas prescriptas en el plan agregado durante la inyección del lote i' , y supone un caudal de inyección igual al valor mínimo permitido y una operación simple por entrega. La entrega de mayor duración fija el valor de $l_{\max}^{(i')}$.

Más aún, es necesario restringir el flujo en cada sección j para asegurar que esté dentro del rango admisible $[vb_{\min}^{(j)} ; vb_{\max}^{(j)}]$, adoptado por el operador de la línea. Para el primer segmento que conecta la refinería con la terminal más cercana ($j = j1$), el flujo resultante está dado por la división entre el volumen inyectado (Q_k) y la duración de dicha operación (L_k). Si $vb_{\min}^{(j1)}$ y $vb_{\max}^{(j1)}$ limitan el caudal del primer segmento de la línea, luego:

$$vb_{\min}^{(j1)} L_k \leq Q_k \leq vb_{\max}^{(j1)} L_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (V.5)$$

La restricción (V.5) denota que el caudal de inyección para cualquier corrida k debe estar dentro del rango permitido para el primer segmento. Las restricciones para el control del flujo en los segmentos aguas abajo serán desarrolladas más adelante.

Las operaciones ficticias son las últimas de cada conjunto ordenado $K_{i'}$. Para evitar soluciones múltiples equivalentes, las operaciones ficticias

propuestas para la inyección de un nuevo "batch" i' deben estar ubicadas siempre al final del conjunto ordenado $K_{i'}$.

$$u_k \leq u_{k-1} \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'}, k > first(K_{i'}) \quad (V.6)$$

Cumplimiento del plan agregado. El volumen total del lote $i' \in I^{new}$, inyectado en el poliducto mientras se ejecuta la secuencia de corridas $k \in K_{i'}$ tiene que ser igual al tamaño original del lote i' especificado por el plan agregado; es decir, $qq_{i'}$.

$$\sum_{k \in K_{i'}} Q_k = qq_{i'} \quad \forall i' \in I^{new} \quad (V.7)$$

V.4.2.2 Restricciones para el seguimiento de lotes en tránsito

Relación entre las coordenadas frontales de dos lotes consecutivos en tránsito al finalizar la operación $k \in K$. Como el lote $(i + 1)$ se introduce inmediatamente después del lote i en la línea, este se moverá justo detrás del lote i a lo largo del poliducto.

Luego, las coordenadas frontales de ambos lotes estarán relacionadas por la ecuación (V.8), donde $W_i^{(k)}$ es el tamaño del lote i al finalizar la corrida $k \in K_{i'}$ que inyecta el lote $i' \geq i$.

$$F_{i+1}^{(k)} + W_i^{(k)} = F_i^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i' \geq i), k \in K_{i'} \quad (V.8)$$

Para $i' = i$, $F_{i+1}^{(k)} = 0$, y la ecuación (V.8) se reduce a: $W_i^{(k)} = F_i^{(k)}$ para cada lote inyectado $i' \in I^{new}$ y para cada corrida $k \in K_{i'}$ relacionada con la inyección de dicho lote.

Tamaño del lote nuevo $i \in I^{new}$ al finalizar la corrida $k \in K_i$ que inyecta una porción de dicho lote. El contenido del lote i al final de la corrida $k \in K_i$ que

inyecta una porción de ese lote i en la línea ($W_i^{(k)}$), se puede obtener a través de su contenido $W_i^{(k-1)}$ al tiempo de finalización de la operación previa ($k-1$), C_{k-1} , adicionándole el volumen inyectado durante la corrida k (Q_k), y substrayendo la cantidad de producto entregada a las terminales desde el lote i , durante esa misma corrida.

$$W_i^{(k)} = W_i^{(k-1)} + Q_k - \sum_{j \in J_{i,i}} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I^{new}, k \in K_i \quad (V.9)$$

Para $k = first(K_i)$, $W_i^{(k-1)} = 0$, ya que dicha operación inicia la inyección del lote i .

Tamaño del lote $i \in I$ al final de la corrida $k \in K_{i'}$, que inyecta un lote i' posterior a i , es decir: $i' > i$. En este caso, el lote i no es el que está siendo inyectado a través de la corrida $k \in K_{i'} (i' > i)$ sino que está en tránsito. Por lo tanto su contenido $W_i^{(k)}$ puede computarse a partir de $W_i^{(k-1)}$, substrayéndole el volumen total derivado desde el lote i a las terminales $j \in J_{i,i'}$ durante la operación k . Los elementos del conjunto $J_{i,i'}$ son las terminales que reciben producto del lote i durante la inserción del lote i' , según lo indica el plan agregado. Si la corrida nunca se realiza ($u_k = 0$), entonces $W_i^{(k)}$ será igual al contenido del lote i al momento de completarse la corrida activa previa debido a que $D_{i,j}^{(k)}$ es igual a cero para cualquier operación ficticia.

$$W_i^{(k)} = W_i^{(k-1)} - \sum_{j \in J_{i,i'}} D_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i' > i), k \in K_{i'} \quad (V.10)$$

Para la primera corrida activa $k = first(K_{i'})$, los lotes $i < i'$ son los lotes que ya fueron inyectados durante el horizonte previo. En otras palabras,

dichos lotes son los que están llenando la línea al inicio del horizonte y $W_i^{(k-1)}$ es el contenido inicial w_{0i} del lote $i \in I^{old}$.

V.4.2.3 Restricciones en la entrega de producto a terminales de distribución

Cota en el tamaño de las entregas. El volumen de producto transferido desde el lote en tránsito $i \in I$ a la terminal $j \in J_{i,i'}$ durante la operación $k \in K_{i'}$ ($D_{i,j}^{(k)}$) debe pertenecer al rango factible $[d_{min}, dd_{i,j}^{(i')}]$. En la restricción (V.11), el parámetro d_{min} es el tamaño mínimo permitido para la entrega de un lote durante una operación de corte, mientras que la cota superior $dd_{i,j}^{(i')}$ está determinada por el tamaño de la entrega a la terminal $j \in J_{i,i'}$ desde el lote i durante la inyección del lote $i' \geq i$, prescripta en el plan maestro de operaciones.

$$d_{min} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq dd_{i,j}^{(i')} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i' \geq i), j \in J_{i,i'}, k \in K_{i'} \quad (V.11)$$

Caudal máximo para las extracciones de productos a terminales. No todas las terminales pueden recibir producto desde el poliducto a la misma velocidad de flujo. En efecto, la restricción (V.12) impone un límite al caudal de entrega a cada terminal. Allí el parámetro vd_j se refiere al caudal máximo de entrega de producto al depósito j . De acuerdo a la hipótesis (e), si se lleva a cabo la entrega de producto desde el lote i a la terminal $j \in J_{i,i'}$ durante la operación k , dicha entrega no puede comenzar después del inicio de esa operación ni terminar antes de la finalización de la corrida k . Más aún, se debe mantener el mismo caudal de entrega durante toda la operación.

$$D_{i,j}^{(k)} \leq vd_j L_k \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i' \geq i), j \in J_{i,i'}, k \in K_{i'} \quad (V.12)$$

Entregas simultáneas con un único lote fuente por terminal activa. La restricción (V.13) se formula para permitir la ocurrencia de entregas simultáneas de productos provenientes de lotes en-tránsito hacia múltiples terminales, durante operaciones no ficticias. Sin embargo, cada nodo de destino j está limitado por la ecuación (V.13) a recibir producto desde como máximo un lote. En otras palabras, se permite la entrega de productos refinados desde la línea a más de una terminal, pero cada terminal activa j puede recibir producto de, a lo sumo, un lote durante una operación de corte. Si la corrida k no se lleva a cabo ($u_k = 0$), luego ninguna entrega de producto se realiza.

$$\sum_{\substack{i \leq i' \\ j \in J_{i,i'}}} x_{i,j}^{(k)} \leq u_k \quad \forall i' \in I^{new}, j \in J, k \in K_{i'} \quad (V.13)$$

Condiciones de factibilidad para la entrega de productos a terminales. Para realizar la entrega de una cierta cantidad de producto desde el lote i a la terminal $j \in J_{i,i'}$ durante una operación no ficticia $k \in K_{i'}$, la coordenada frontal del lote i al tiempo C_{k-1} no puede ser inferior a la coordenada volumétrica σ_j de la terminal en cuestión. Caso contrario, dicha operación de entrega no puede ejecutarse durante la corrida de bombeo k ya que la hipótesis (e) no podrá cumplirse. Para $k = 1$, $F_i^{(k-1)}$ es la coordenada frontal f_{0i} del lote en tránsito i .

$$F_i^{(k-1)} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i' \geq i), j \in J_{i,i'}, k \in K_{i'} \quad (V.14)$$

De acuerdo a la hipótesis (e), la coordenada posterior del lote i al tiempo C_k debe ser menor que σ_j para prevenir detenciones tempranas de la entrega de producto; es decir, antes que la operación de multi-corte k se

complete. De lo contrario, una porción del próximo lote ($j + 1$) conteniendo otro producto podría ser introducido en el tanque del depósito j destinado al producto del lote i . Esto ocurre debido a que las válvulas de entrada de los tanques de recepción permanecen abiertas durante toda la corrida. Se vuelve así necesario considerar la restricción (V.15), en la cual el parámetro pv representa el volumen total del poliducto.

$$F_i^{(k)} - W_i^{(k)} \leq \sigma_j + (pv - \sigma_j) (1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad (V.15)$$

$$\forall i \in I, i' \in I^{new} (i' > i), j \in J_{i,i'}, k \in K_{i'}$$

Las Figuras V.5 y V.6 ilustran las condiciones de factibilidad para la realización de entregas simultáneas durante una operación multi-corte. En ambos casos, se analiza la factibilidad de realizar entregas simultáneas de productos a las terminales $D1$, $D2$, y $D3$ durante la misma corrida k .

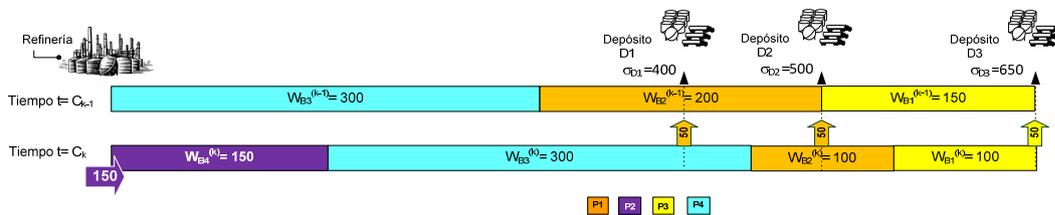


Figura V.5. Ilustración de condiciones no-factibles para entregas simultáneas

Como se puede observar, la operación detallada que se muestra en la Figura V.5 no es una opción factible ya que la coordenada superior del lote $B2$ (Producto $P1$) al tiempo C_k ha sobrepasado la ubicación del depósito $D1$ después de inyectar 150 unidades del nuevo lote $B4$. Como resultado, la entrega de producto $P1$ desde el lote $B2$ hacia el depósito $D1$ debe detenerse antes de finalizar la operación multi-corte k a través del cierre de

la válvula de entrada del tanque receptor en $D1$. Caso contrario, el producto $P4$ proveniente del lote $B3$ se descargaría dentro del mismo tanque. Bajo dichas condiciones, la hipótesis (e) se violaría y por lo tanto la corrida propuesta es una operación infactible.

Una operación multi-corte factible se muestra en la Figura V.6.

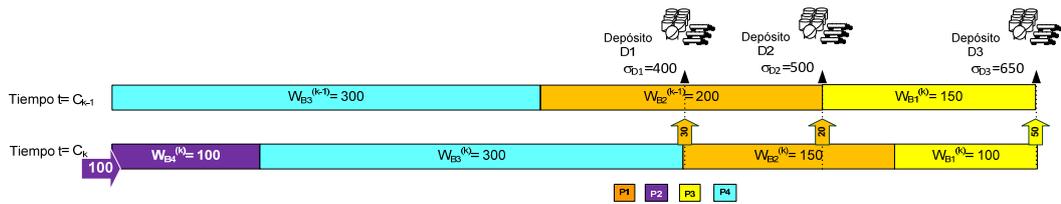


Figura V.6. Ilustración de condiciones factibles para realizar una operación de corte múltiple

La viabilidad se consigue acortando la duración de la operación detallada k . Ahora, sólo 100 unidades del lote $B4$ son inyectadas en el origen de la línea. De esta forma, las restricciones (V.14) y (V.15) son ambas satisfechas y las válvulas de entrada de los tanques receptores $D1$, $D2$, y $D3$ pueden permanecer abiertas a lo largo de toda la operación multi-corte (ver Figura V.6).

Si una de las condiciones de factibilidad no puede ser satisfecha, entonces $x_{i,j}^{(k)}$ es igual a cero, las ecuaciones (V.14) y (V.15) se vuelven redundantes y la entrega de producto desde el lote i a la terminal j nunca se ejecuta.

Cota superior adicional para el tamaño de las entregas de productos a terminales. Hasta el momento, el volumen $D_{i,j}^{(k)}$ transferido desde el lote i a la terminal $j \in J_{i,i'}$ durante la corrida $k \in K_{i'}$ está acotada por la restricción (V.11). Dicha ecuación impide que la variable $D_{i,j}^{(k)}$ exceda el valor $dd_{i,j}^{(i')}$.

Adicionalmente, la restricción (V.16) impone que $D_{i,j}^{(k)}$ no supere el contenido del lote i al final de la corrida previa ($k - 1$).

$$\sum_{j \in J_{i,i'}} D_{i,j}^{(k)} \leq W_i^{(k-1)} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i' \geq i), k \in K_{i'} \quad (V.16)$$

Balance exacto entre los volúmenes de ingreso y egreso durante la operación k . De acuerdo a la hipótesis de incompresibilidad de los líquidos, la cantidad de producto que ingresa a la línea a lo largo de la operación k , tiene que ser equivalente al volumen total transferido desde el poliducto hacia los depósitos, durante la misma corrida.

$$\sum_{\substack{i \in I \\ i \leq i'}} \sum_{j \in J_{i,i'}} D_{i,j}^{(k)} = Q_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_{i'} \quad (V.17)$$

Cumplimiento de las entregas agregadas planificadas. El volumen total entregado desde el lote i a la terminal receptora $j \in J_{i,i'}$ durante la secuencia de corridas $k \in K_{i'}$, que inyectan el lote i' , tiene que igualar el volumen $dd_{i,j}^{(i')}$, prescripto en el plan agregado.

$$\sum_{k \in K_{i'}} D_{i,j}^{(k)} = dd_{i,j}^{(i')} \quad \forall i \in I, i' \in I^{new} (i' \geq i), j \in J_{i,i'} \quad (V.18)$$

Identificación de los segmentos activos y detenidos durante una operación de entrega múltiple. Cuando una determinada cantidad de producto se entrega desde la tubería a la terminal j durante una operación detallada k , todos los segmentos de la tubería que conectan la estación de entrada con el depósito j están activos. En otras palabras, si se entrega producto al depósito j , existe un flujo de combustible en movimiento en todos los segmentos j' ubicados aguas arriba de j ; es decir, en todo segmento $j' \leq j$. La variable $v_{j'}^{(k)}$ relacionada, que indica si el segmento j' está activo durante la operación k , vale uno. Por otra parte, el flujo se

detiene por completo aguas abajo de la terminal activa más lejana (por ejemplo, j_k^*), y en ese caso $v_{j'}^{(k)} = 0$ para todo $j' > j_k^*$. De acuerdo a lo anterior, el valor de $v_j^{(k)}$ para cada sección j a lo largo de la operación k se puede determinar a través de las restricciones (V.19), (V.20) y (V.21).

$$v_j^{(k)} \geq \sum_{\substack{i \in I' \\ j \in J_{i,j'}}} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall i' \in I^{new}, j \in J, k \in K_{i'} \quad (V.19)$$

$$v_{j-1}^{(k)} \geq v_j^{(k)} \quad \forall j \in J (j > 1), k \in K \quad (V.20)$$

$$v_j^{(k)} \leq \sum_{j' \geq j} \sum_{\substack{i \in I' \\ j' \in J_{i,j'}}} x_{i,j'}^{(k)} \quad \forall i' \in I^{new}, j \in J, k \in K_{i'} \quad (V.21)$$

La restricción (V.19) fuerza a la variable $v_j^{(k)}$ a ser igual a uno para indicar que el segmento j está activo, cuando la terminal $j \in J_{i,j'}$ recibe producto desde algún lote $i \in I$ durante la corrida $k \in K_{i'}$. Por la restricción (V.13), el valor de $v_j^{(k)}$ nunca será mayor a 1.

En cambio, la restricción (V.20) establece que si existe un flujo finito a través del segmento j durante la operación de bombeo k ($v_j^{(k)} = 1$), el segmento $(j - 1)$, ubicado aguas arriba de j , estará activo. Más aún, todo segmento ubicado aguas arriba, conectando la estación de ingreso con el segmento j , también estará activo.

Por otra parte, la restricción (V.21) establece que la variable $v_j^{(k)}$ será igual a cero si no hay entrega de producto a la terminal j ni a cualquier otro destino j' ubicado aguas abajo de la terminal j ($j' > j$).

Identificando la terminal activa más alejada. Para cuantificar el volumen de combustible puesto en movimiento en una tubería con una única terminal de inyección ubicada en el origen, basta con identificar el depósito activo más lejano. Bajo este concepto, se introduce la variable FAT_k que

representa la coordenada volumétrica de la terminal activa más alejada del origen del poliducto durante la corrida k . Dicha variable servirá para dimensionar el volumen reactivado ó detenido en cada operación k .

De acuerdo a la restricción (V.22), FAT_k nunca debería ser inferior a la coordenada volumétrica de cualquier otra terminal activa durante la corrida k . Más aún, la ecuación (V.23) establece que FAT_k nunca puede ser mayor que la coordenada volumétrica de alguna terminal j precediendo un segmento inactivo ($j + 1$) durante la corrida k . Si el segmento j está activo ($v_j^{(k)} = 1$) y el segmento adyacente aguas abajo está detenido ($v_{j+1}^{(k)} = 0$), luego la terminal j es el depósito más alejado que está recibiendo producto desde la línea; es decir, $FAT_k = \sigma_j$.

$$FAT_k \geq \sigma_j v_j^{(k)} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (V.22)$$

$$FAT_k \leq \sigma_j + (pv - \sigma_j) (1 - v_j^{(k)} + v_{j+1}^{(k)}) \quad \forall j \in J, k \in K \quad (V.23)$$

Si el segmento j no está activo, la sección adyacente aguas abajo ($j + 1$) también estará detenida de acuerdo a la restricción (V.20), y $v_j^{(k)} = v_{j+1}^{(k)} = 0$. En ese caso, ambas ecuaciones (V.22) y (V.23) son redundantes ($0 \leq FAT_k \leq pv$) y el valor de FAT_k estará determinado por una terminal activa aguas arriba.

Para el caso de un corrida de bombeo ficticia $k \in K_f$, se cumple que $x_{i,j}^{(k)} = 0$ para todo $i \in I$ y $j \in J_{i,i'}$. Como consecuencia, $v_j^{(k)} = 0$ para cada segmento j debido a las restricciones (V.13) y (V.19), y ninguna restricción se impone sobre el valor de FAT_k más que $0 \leq FAT_k \leq pv$.

Monitoreando el caudal del flujo en cada segmento del poliducto. El volumen total fluyendo a través de un segmento activo j (con $v_j^{(k)} = 1$) durante una corrida de bombeo k puede ser fácilmente computado sumando las derivaciones de producto $D_{i,j}^{(k)}$ realizadas en las terminales aguas abajo de j incluida la terminal j : $j' \geq j$. El caudal resultante debe pertenecer a un rango factible para el segmento j , tal como especifica la restricción (V.24):

$$vb_{\min}^{(j)} L_k - q_{\max} (1 - v_j^{(k)}) \leq \sum_{i \leq i'} \sum_{\substack{j' \in J_{ii'} \\ j' \geq j}} D_{i,j'}^{(k)} \leq vb_{\max}^{(j)} L_k \quad (\text{V.24})$$

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

Para un segmento j detenido durante la corrida k ($v_j^{(k)} = 0$), se cumple que $x_{i,j}^{(k)} = 0$ para todo $i \in I$ y $j' \geq j$ dado por las restricciones (V.19) y (V.20). Por lo tanto, ninguna entrega de producto se realiza a los depósitos $j' \geq j$ durante la corrida k . Luego, $\sum_{i \leq i'} \sum_{j' \geq j} D_{i,j'}^{(k)} = 0$ y el lado izquierdo de la inecuación (V.24) se relaja restando el tamaño máximo permitido para una inyección q_{\max} .

A continuación se desarrollan las restricciones que servirán para estimar el costo de reactivación del flujo en segmentos del poliducto al permitir entregas simultáneas de producto. Al comienzo de cada nueva operación multi-corte, el movimiento del fluido en segmentos inactivos del poliducto debe ser restaurado si la nueva terminal activa más lejana j_k^* está localizada aguas abajo de la previamente abastecida j_{k-1}^* , es decir, más lejos del origen. Por lo tanto es importante identificar las coordenadas de las terminales activas más alejadas del origen durante dos corridas sucesivas (k

- 1) y k , dado por FAT_{k-1} y FAT_k . Por diferencia, se podrá hallar el volumen total activado por la operación k (AV_k).

Si, $FAT_k > FAT_{k-1}$, el flujo en los segmentos del poliducto aguas abajo de la terminal j_{k-1}^* se reactiva al tiempo $(C_k - L_k)$ y habrá un aumento del volumen total reactivado, dado por $AV_k = FAT_k - FAT_{k-1}$.

Si en cambio, la nueva terminal más lejana recibiendo producto está más cerca de la terminal de inyección que j_{k-1}^* ($FAT_k < FAT_{k-1}$), el flujo en los segmentos que conectan las terminales j_k^* y j_{k-1}^* se detendrá. Luego, habrá un aumento del volumen inactivo de la tubería dado por $SV_k = FAT_{k-1} - FAT_k$.

En resumen, cada vez que la terminal activa más lejana se modifica entre dos corridas sucesivas, habrá una variación en el volumen total reactivado o detenido. En cambio, si la terminal activa más lejana no cambia entre dos operaciones sucesivas; es decir, $j_k^* = j_{k-1}^*$, entonces la ejecución de la corrida k no producirá variación en el volumen total reactivado ó detenido ($AV_k = SV_k = 0$).

Las restricciones (V.25) y (V.26) definen, respectivamente, los volúmenes reactivados (AV_k) ó detenidos (SV_k) durante la corrida k .

Para la primera corrida: $k = first(K_i)$, la coordenada σ_{AT} de la terminal más lejana recibiendo producto en la operación previa, es un dato del problema. Es decir, se conoce de antemano la última terminal activa del horizonte previo, y por lo tanto, $FAT_{k-1} = \sigma_{AT}$. Si en cambio, el poliducto se encuentra inactivo al tiempo de inicio $t = 0$, entonces $FAT_{k-1} = \sigma_{AT} = 0$.

$$AV_k \geq FAT_k - FAT_{k-1} \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_i \quad (V.25)$$

$$SV_k \geq FAT_{k-1} - FAT_k \quad \forall i' \in I^{new}, k \in K_i \quad (V.26)$$

Para las operaciones ficticias, no hay restricciones impuestas en el valor de FAT_k más que $0 \leq FAT_k \leq pv$. Puesto que el objetivo del problema es minimizar los valores de AV_k y SV_k , es sencillo deducir que $FAT_k = FAT_{k-1}$ para cualquier operación ficticia k .

V.4.3 Función Objetivo

El objetivo del problema consiste en desarrollar un programa detallado que satisfaga el plan agregado a mínimo costo total de reactivación del flujo en segmentos del poliducto, y de encendido/apagado de bombas. Esto se logra minimizando los volúmenes de reactivaciones/ detenciones del flujo dentro del poliducto mediante el menor número de operaciones de corte posible.

$$\text{Min } z = \sum_{k \in K} (cs SV_k + ca AV_k + fco u_k) \quad (\text{V.27})$$

En la ecuación (V.27), el parámetro cs es el costo por unidad de volumen detenido, ca es el costo por unidad de volumen activado, y fco es el costo fijo asociado a la ejecución de una operación multi-corte.

En resumen, la nueva propuesta de optimización está basada en la formulación de un modelo matemático de tipo lineal mixto entero (MILP) que comprende el conjunto de restricciones (V.1) a (V.26) y la función objetivo (V.27). Cuando el plan agregado incluye una detención completa de la tubería en un intervalo intermedio para realizar operaciones de mantenimiento o para otros fines, el enfoque propuesto se aplica secuencialmente a refinar el plan maestro para cada período activo del poliducto.

V.5. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

El modelo matemático propuesto para refinar el plan agregado será aplicado al mismo caso de estudio resuelto en los capítulos anteriores. Dicho caso de estudio considera el programa de entregas de productos derivados del petróleo de un poliducto brasileño de 955 km de longitud que conecta la refinería de REPLAN con São Paulo y posee cinco centros de distribución (*D1-D5*) a lo largo de su recorrido. Cinco segmentos componen el poliducto cuyas capacidades volumétricas se muestran en la Tabla V.1. El poliducto transporta cuatro productos (*P1*: gasolina, *P2*: diesel, *P3*: LPG, y *P4*: jet-fuel) y su diámetro se reduce en el último segmento *D4 - D5* para mantener mejores condiciones operativas.

Tabla V.1. Capacidad volumétrica de los segmentos

Segmento	Volumen [10^2 m ³]
Refinería - Terminal D1	400
Terminal D1 - Terminal D2	250
Terminal D2 - Terminal D3	250
Terminal D3 - Terminal D4	600
Terminal D4 - Terminal D5	135

Los Ejemplos V.1 y V.2 resuelven dos instancias del caso de estudio. En el Ejemplo V.1, se considera un horizonte de tiempo de 75 h, a fin de comparar los resultados obtenidos con el plan detallado que reportaron Rejowski y Pinto en su publicación del año 2004. Dichos autores resuelven el mismo caso de estudio a través de una formulación lineal mixta entera de tipo discreta. También podrán ser comparados con la solución obtenida al utilizar el enfoque de tipo continuo, propuesto en el Capítulo anterior, con entregas simples.

Para realizar una apropiada comparación, se usarán los mismos datos del problema resuelto por Rejowski y Pinto (2004).

Por su parte, el Ejemplo V.2 considera el programa detallado de entregas para un sistema similar, pero en este caso sobre un horizonte de cuatro semanas de duración. Los datos de planeación agregada para el Ejemplo V.2 pueden encontrarse en Cafaro y Cerdá (2008). El mismo ejemplo ya fue resuelto en el Capítulo IV para obtener el programa detallado con entregas simples. Precisamente, uno de los objetivos del Ejemplo V.2 es mostrar las ventajas de permitir entregas simultáneas en lugar de entregas simples.

Los modelos matemáticos de los Ejemplos V.1 y V.2 fueron resueltos con un procesador Intel Core i7 (3.33 GHz) utilizando GAMS/GUROBI 3.0 (Brooke y colab., 2006) con cuatro núcleos en paralelo. La tolerancia de optimalidad permitida es 10^{-9} . Además, se adoptaron los siguientes valores para los coeficientes de la función objetivo: $ca = 0.10$ [\$/m³], $cs = 0.00$ [\$/m³], y $fco = 1000$ [\$/operación].

V.5.1. Ejemplo V.1

En el Ejemplo V.1 se supone que el poliducto está en reposo al comienzo del horizonte de planificación. Esto significa que inicialmente el fluido está estático en todos los segmentos del poliducto. El caudal de inyección puede variar entre 800 y 1200 m³/h y el horizonte de tiempo tiene una duración total de 75 h.

La Tabla V.2 resume los niveles iniciales de inventario de cada producto en cada destino y las entregas de productos a realizar a cada terminal durante la inyección de cada lote, especificadas en el plan agregado.

Tabla V.2. Capacidad volumétrica, condiciones iniciales y demanda de cada depósito

Depósito	Producto	Capacidades Max/min [10 ² m ³]	Inventario Inicial de Productos en Depósitos [10 ² m ³]	Demanda [10 ² m ³]
Rib. Preto (1)	Gasoline	190/50	100	0
	Diesel	270/90	180	150
	LPG	120/20	90	0
	Jet fuel	0/0	0	0
Uberaba (2)	Gasoline	90/30	40	0
	Diesel	190/50	150	150
	LPG	0/0	0	0
	Jet fuel	0/0	0	0
Uberlandia (3)	Gasoline	90/20	50	0
	Diesel	270/90	180	0
	LPG	120/20	60	0
	Jet fuel	0/0	0	0
Goiania (4)	Gasoline	190/50	110	300
	Diesel	720/150	350	0
	LPG	180/20	40	50
	Jet fuel	140/30	90	0
Brasilia (5)	Gasoline	180/50	90	80
	Diesel	720/150	330	120
	LPG	92/20	40	0
	Jet fuel	136/25	110	0

En la Figura V.7 y en la Tabla V.3 se describe el programa detallado de operaciones de entregas que se obtiene a través de la resolución del modelo discreto MILP propuesto por Rejowski y Pinto (2004).

Para desarrollar la formulación del problema, dichos autores propusieron dividir el horizonte de planeación en 15 intervalos de 5 h de duración cada uno, y particionar cada segmento del poliducto, excepto el último de ellos, en "packs" de 50 [10^2 m³]. Cada "pack" contiene un único producto. El segmento *D4-D5* está, en cambio, dividido en "packs" de 27 [10^2 m³], y cada entrega realizada al depósito *D5* debe estar acompañada de una extracción de producto en la terminal *D4* para reducir el caudal en el último segmento dado que su diámetro es el menor. Como resultado, la cantidad de producto inyectada en la línea tiene que ser un entero múltiplo de 50 [10^2 m³] para cualquier corrida de bombeo.

El "schedule" detallado de operaciones reportado por Rejowski y Pinto (2004), comprende ocho corridas de bombeo mediante las cuales se inyecta una secuencia de cuatro lotes: $P1_{50}$, $P2_{500}$, $P1_{50}$, y $P3_{150}$ (los subíndices indican el tamaño del lote); es decir, un volumen total de 750 [10^2 m³]. El poliducto opera sin interrupciones a una tasa fija de bombeo de 1000 m³/h. El lote $P2_{500}$ se introduce gradualmente a través de cuatro operaciones, mientras que para inyectar el lote $P3_{150}$ se requieren dos operaciones. Más aún, a lo largo del horizonte de planeación se requieren en total once operaciones de entrega. Debido a que el último lote inyectado en la línea antes de comenzar el nuevo horizonte contiene producto *P1*, el primer lote $P1_{50}$ no genera nueva interfase de combustible. Sin embargo, a posteriori se generan tres interfases adicionales, dos de las cuales son originadas por la inyección de $P1_{50}$ entre los productos incompatibles $P2_{500}$ y $P3_{150}$.

Analizando la Figura V.7 se puede concluir que habrá un faltante de 10 unidades de $P2$ en el depósito $D1$. Esto ocurre porque la entrega de 50 unidades de $P2$ (Diesel) a la terminal $D1$ durante la última corrida sumado al inventario inicial de 180 unidades, resulta insuficiente para abastecer las 150 unidades demandadas por dicho depósito sin violar el nivel de stock mínimo establecido. El stock de $P2$ en $D1$ se actualiza a 230 unidades, y una vez satisfecho el requerimiento de la terminal quedará un remanente de 80 unidades en inventario y el mínimo está establecido en 90.

En términos de costos, el programa reportado por Rejowski y Pinto presenta un volumen total activado de 2485 unidades volumétricas y 8 operaciones detalladas. Por lo tanto la función objetivo (V.27) toma un valor de \$ 32850.

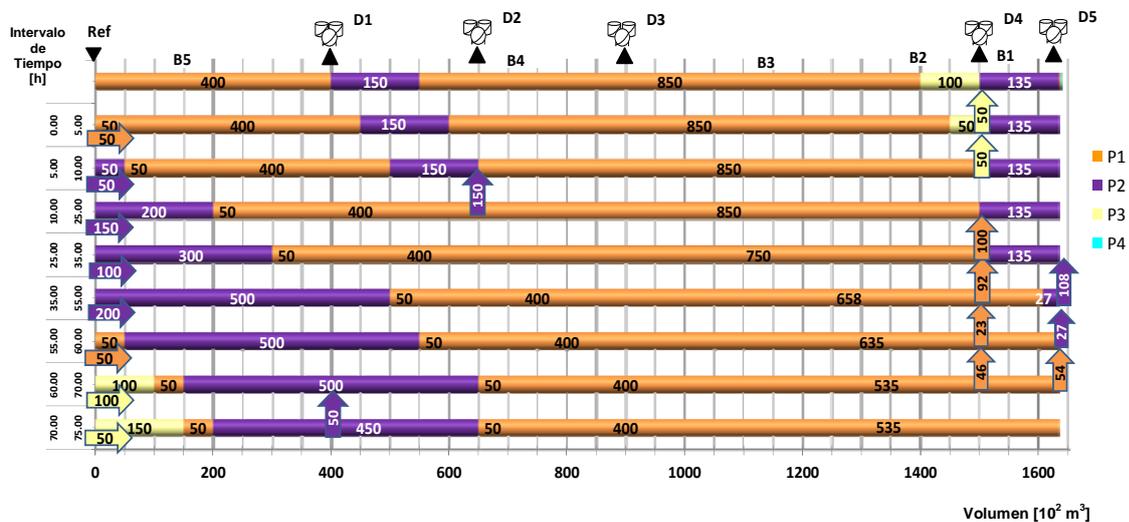


Figura V.7. Programación Detallada para el Ejemplo V.1 reportada por Rejowski & Pinto (2004).

A continuación, se resuelve el mismo ejemplo a través del modelo MILP propuesto en la Sección V.4 de este capítulo. A tal fin, como primera medida, se genera el plan agregado de ingresos y entregas para el Ejemplo V.1, utilizando la formulación de tiempo continuo de tipo MILP propuesta

por Cafaro y Cerdá (2004). La información obtenida en la etapa de planeación agregada se muestra en la Figura V.8 y Tabla V.4. Dicha solución fue hallada en 0.245 segundos de CPU y consiste en una secuencia de dos corridas de inyección de un par de lotes nuevos P_{230} y P_{2595} , lo que representa un volumen total a inyectar de 625 [10^2 m³]; es decir, 125 unidades menos que con el enfoque discreto.

Tabla V.3. Resultados del Ejemplo 1 reportados por Rejowski & Pinto (2004)

Op.	Inicio [h]	Fin [h]	Prod. Inyectado	Vol. [10^2 m ³]	Prod. Entregado	Vol. [10^2 m ³]	Destino	Vol. Activado [10^2 m ³]	Vol. Detenido [10^2 m ³]
1	0	5	P1	50	P3	50	D4	1500	-
2	5	10	P2	50	P3	50	D4	-	-
3	10	25	P2	150	P2	150	D2	-	850
4	25	35	P2	100	P1	100	D4	850	-
5	35	55	P2	200	P1-P2	92-108	D4-D5	135	-
6	55	60	P1	50	P1-P2	23-27	D4-D5	-	-
7	60	70	P3	100	P1-P1	46-54	D4-D5	-	-
8	70	75	P3	50	P2	50	D1	-	1235

Como resultado, el poliducto trabaja solamente 61.61 h para atender la demanda, iniciando las operaciones de bombeo a la hora 13.39. Más aún, sólo una interfase simple se genera y se planifican siete entregas agregadas, incluyendo la transferencia de 60 unidades de $P2$ a $D1$ para satisfacer su demanda y el cumplimiento del stock mínimo del depósito $D1$ (la solución anterior reportaba la entrega de 50 unidades incumpliendo ese

requisito). La Tabla V.4 presenta el tamaño original y el producto contenido en cada lote nuevo, junto con los tiempos de inicio y finalización de la correspondiente corrida agregada.

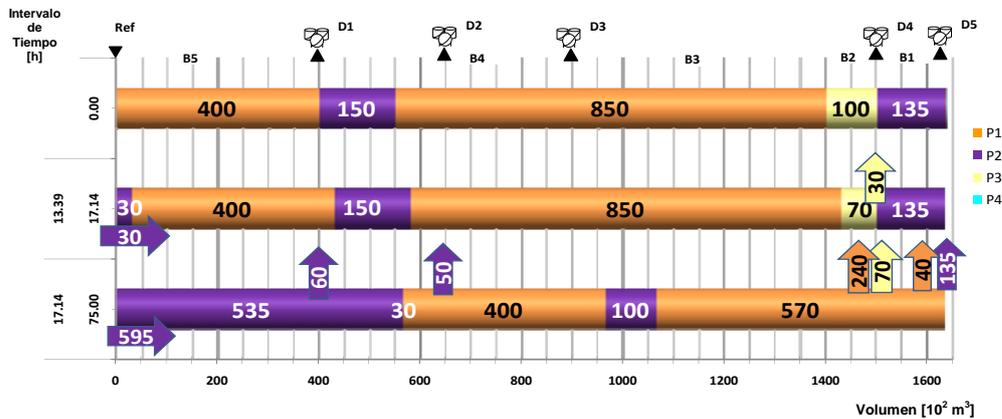


Figura V.8. Programación Agregada para el Ejemplo V.1 aplicando el enfoque de Cafaro & Cerdá (2004)

Tabla V.4. Plan Agregado de Entradas para el Ejemplo V.1, utilizado el enfoque de Cafaro & Cerdá (2004)

Lote	Producto	Volumen [10 ² m ³]	Hora de Inicio [h]	Hora de Fin [h]	Caudal promedio [m ³ /h]
B6	P2	30.0	13.39	17.14	800
B7	P2	595.0	17.14	75.00	1028

Para determinar el mejor programa detallado utilizando la formulación propuesta en la sección anterior, es necesario fijar previamente la cardinalidad de cada conjunto K_i , $i \in I^{new}$ y como resultado la del conjunto K . Dado que se permiten entregas simultáneas en una misma corrida, es de esperar que el número de operaciones de cortes múltiples requerido para cumplimentar las entregas de productos a terminales durante la inyección del lote i ($|K_i|$) no exceda el número de entregas a realizar a lo largo de esa corrida, conforme a lo que indica el plan agregado de salidas. Como

resultado, se espera que la cardinalidad del conjunto K no exceda el número total de entregas agregadas. Por lo tanto se adopta como valor inicial la cantidad de despachos de la planificación agregada; en este caso, $|K| = 7$.

Además, el número de corridas relacionadas con la inyección de un lote i (es decir, $|K_i|$) se iguala al número de descargas agregadas a realizar hacia las terminales mientras se introduce el lote i en la tubería. Por lo tanto, $|K_{B6}| = 1$ y $|K_{B7}| = 6$. Además, el rango del caudal se establece dentro del intervalo $[600 - 1200 \text{ m}^3/\text{h}]$ para los segmentos D1–D2, D2–D3 y D3–D4, mientras que para el último tramo se define el rango $[400 - 800 \text{ m}^3/\text{h}]$. El mejor plan detallado para el Ejemplo V.1 provisto por el nuevo enfoque se muestra en la Figura V.9 y Tabla V.5. La formulación matemática que incluye 1088 variables, de las cuales 55 son de tipo binarias, y 701 restricciones, se resuelve en 0.123 segundos de CPU.

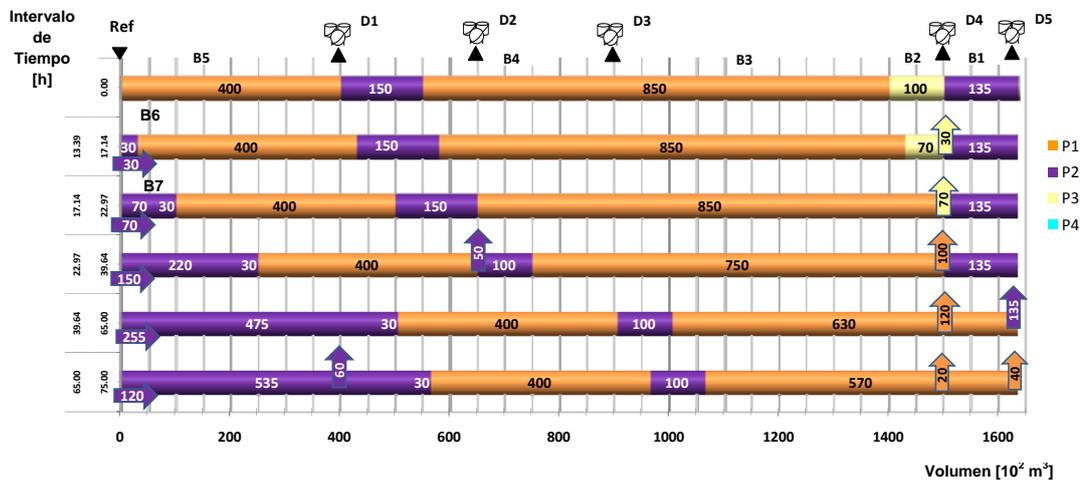


Figura V.9. "Schedule" detallado óptimo para el Ejemplo V.1

La inyección del lote B7, que comienza al tiempo $t=17.14$ h, requiere cuatro de las seis corridas posibles para completar las entregas agregadas previstas mientras se introduce B7. Por lo tanto, no es posible realizar

mejoras incrementando el número de operaciones, y de este modo se puede concluir que el programa detallado óptimo ha sido encontrado.

Considerando un horizonte de 75 horas, se observa que es necesaria la realización de cinco operaciones con múltiples cortes. Más aún, el volumen total activado es de 1635 unidades y no hay volumen detenido.

Como resultado, el valor de la función objetivo cae a \$ 21350. Comparado con el enfoque discreto de Rejowski y Pinto, presentado anteriormente, el valor de la función objetivo desciende \$ 11500 (\$ 21350 vs. \$ 32850) y el volumen total inyectado disminuye de 750 [10^2m^3] con el enfoque discreto, a 625 [10^2m^3] con la nueva formulación continua MILP.

El lote $B6_{30}$ se bombea a un caudal de alimentación de $800 \text{ m}^3/\text{h}$ para despachar producto $P3_{30}$ en el depósito $D4$. En cambio, las siguientes cuatro corridas se llevan a cabo a diferentes velocidades de bombeo para inyectar el lote $B7_{595}$:

- (i) Desde la hora 17.14 h hasta las 22.97 h, se bombean 70 unidades de $P2$ a una velocidad de inyección de $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ para despachar $P3_{70}$ hacia la terminal $D4$.
- (ii) Otras 150 unidades de $P2$ se introducen a una velocidad de bombeo de $900 \text{ m}^3/\text{h}$ para enviar $P2_{50}$ hacia $D2$, y $P1_{100}$ hacia $D4$ durante el intervalo de tiempo [22.97; 39.64 h]. En este sentido, el caudal en los segmentos $D2-D3$ y $D3-D4$ se mantiene al mínimo valor posible $600 \text{ m}^3/\text{h}$.
- (iii) Durante el intervalo [39.64 ; 65.00 h], 255 unidades de volumen de $P2$ se inyectan a una velocidad de $1005 \text{ m}^3/\text{h}$ para, simultáneamente, despachar $P1_{120}$ a $D4$, y $P2_{135}$ hacia la última terminal $D5$. La extracción de producto en el depósito $D4$ reduce el

caudal del flujo del último segmento $D4 - D5$ a $532 \text{ m}^3/\text{h}$, mayor aún que el mínimo impuesto de $400 \text{ m}^3/\text{h}$.

(iv) Desde la hora 65.00 hasta las 75.00 h, hay tres derivaciones simultáneas: $P2_{60}$ al depósito $D1$, $P1_{20}$ a $D4$, y $P1_{40}$ a $D5$, mientras se bombean $P2_{120}$ a una velocidad de alimentación de $1200 \text{ m}^3/\text{h}$. Las entregas de productos a las terminales $D1$ y $D4$ reducen el caudal del flujo de combustible al valor mínimo de $600 \text{ m}^3/\text{h}$ en los segmentos que conectan a $D1$ con $D4$ y el valor más bajo de $400 \text{ m}^3/\text{h}$ para la última sección, $D4 - D5$.

Comparando los atributos más importantes de los dos planes detallados mostrados en las Tablas V.3 y V.5 (es decir, volumen total inyectado, tiempo de operación, número de corridas, y el volumen total activado), está claro que el enfoque de tiempo continuo desarrollado en dos etapas, que permite operaciones de corte múltiple en el nivel detallado ó inferior, presenta una clara ventaja. También se obtienen beneficios substanciales en cuanto al volumen total de interfases y a los costos de mantenimiento de inventario.

V.5.2 Ejemplo V.2

El Ejemplo V.2 es una variante del ejemplo previo que considera un horizonte rodante de cuatro semanas. Este caso de estudio fue introducido por Cafaro y Cerdá (2008) para ilustrar las ventajas del enfoque de "scheduling" dinámico, a través del cual al inicio de cada periodo semanal se actualiza el plan agregado del poliducto. De este modo, el plan agregado se puede regenerar periódicamente teniendo en cuenta cambios en la demanda de las terminales, por la aparición de nuevas órdenes ó cancelación de otras incluidas en el plan, mientras el horizonte de

planificación rueda a través del tiempo. El plan agregado de inyecciones de productos se muestran en la Tabla V.6; mientras que las capacidades volumétricas de los cinco segmentos fueron incluidas en la Tabla V.1.

Tabla V.5. "Schedule" detallado obtenido para el Ejemplo V.1 aplicando el enfoque propuesto

Op.	Inicio [h]	Fin [h]	Prod. Inyectado	Vol. [10 ² m ³]	Prod. Entregado	Vol. [10 ² m ³]	Terminal de Destino	Vol. Activado [10 ² m ³]
1	13.39	17.14	P2	30	P3	30	D4	1500
2	17.14	22.97	P2	70	P3	70	D4	-
3	22.97	39.64	P2	150	P2 - P1	50-100	D2 - D4	-
4	39.64	65.00	P2	255	P1 - P2	120-135	D4 - D5	135
5	65.00	75.00	P2	120	P2 - P1 - P1	60-20 - 40	D1 - D4 - D5	-

La programación agregada óptima reportada por Cafaro y Cerdá (2008) se presenta en la Figura V.10. Dicho plan se obtuvo mediante la resolución secuencial de la formulación de "scheduling" dinámica correspondiente a las cuatro instancias del horizonte de planificación, a saber: el horizonte inicial y los nuevos horizontes que se generan al completarse la primera, segunda y tercera semana, respectivamente. Cada instancia se resuelve en un tiempo promedio de CPU de 172 segundos.

El plan agregado hallado comprende la inyección de nueve lotes nuevos (B6 a B14) que ingresan a la tubería desde el origen del poliducto. En la Tabla V.6 se describe el producto contenido y el tamaño original de cada lote nuevo, así como el tiempo de inicio de cada corrida agregada

relacionada. El tamaño mínimo de entrega (d_{\min}) se fija en 5 [10² m³], el caudal de bombeo debe pertenecer al intervalo [800 – 1200 m³/h], y se considera que todos los segmentos están inicialmente detenidos. Información complementaria del problema de "scheduling" agregado puede hallarse en la publicación de Cafaro y Cerdá (2008).

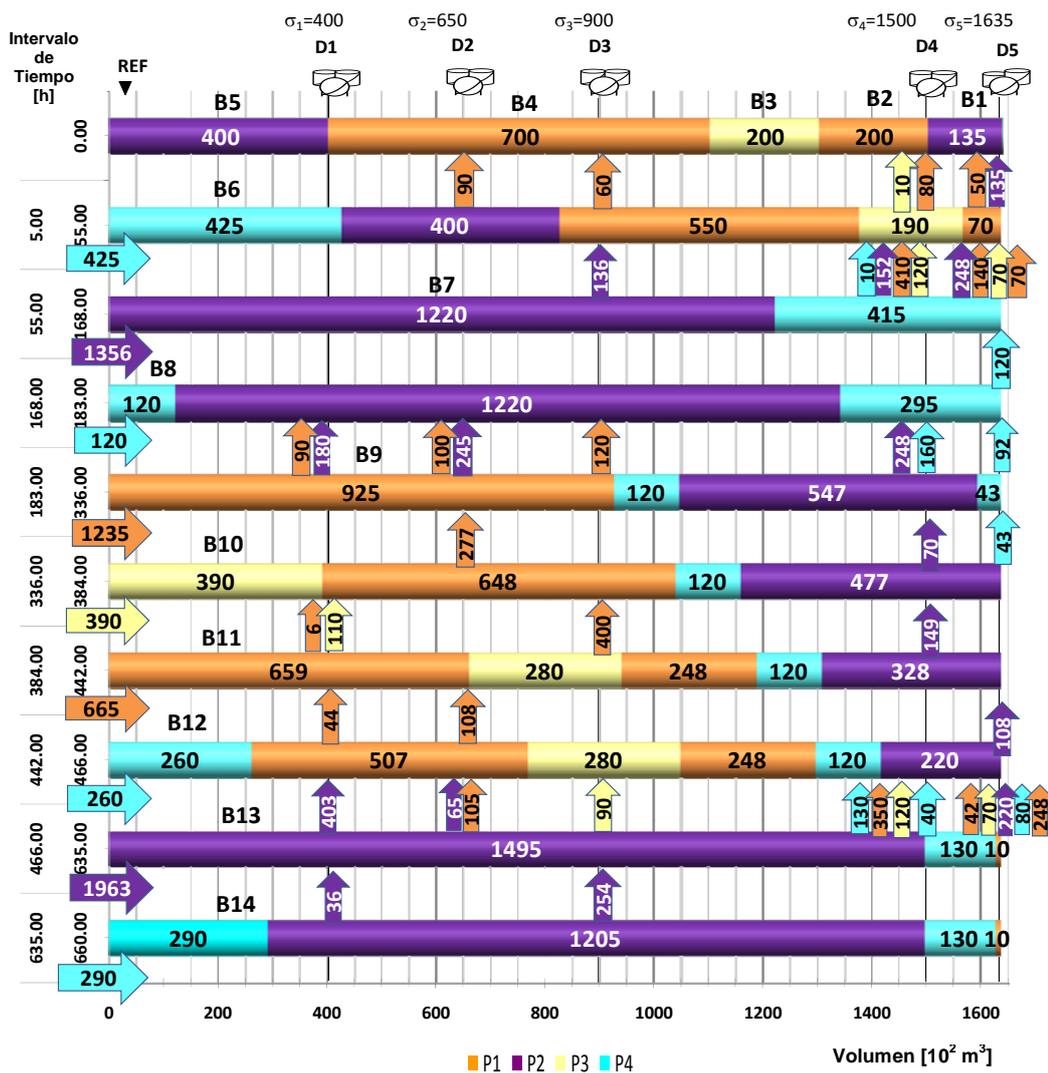


Figura V.10. Plan Agregado para el Ejemplo V.2 reportado por Cafaro & Cerdá (2008).

Tabla V.6. "Schedule" Agregado reportado por Cafaro & Cerdá (2008) para el Ejemplo V.2

Lote	Producto	Volumen [10 ² m ³]	Hora de inicio [h]
B6	P4	425	5.0
B7	P2	1356	55.0
B8	P4	120	168.0
B9	P1	1235	183.0
B10	P3	390	336.0
B11	P1	665	384.0
B12	P4	260	442.0
B13	P2	1963	466.0
B14	P4	290	635.0

A continuación, se resuelven dos instancias del ejemplo utilizando el nuevo enfoque. La primera instancia, se denominada Ejemplo V.2A, permite la ejecución de entregas simultáneas a múltiples terminales en una misma operación de inyección, suponiendo un rango común de caudales factibles que va de 0 a 1200 m³/h para cada sección del poliducto. Por lo tanto, no se especifica ningún caudal mínimo para los segmentos activos. En la segunda instancia del ejemplo, llamado Ejemplo V.2B, se considera un caudal mínimo de 700 m³/h para el primer segmento (*Refinería-D1*), y 600 m³/h para los segmentos *D1-D2*, *D2-D3*, y *D3-D4*. Además, el caudal en el último segmento (*D4-D5*) cuyo diámetro es el menor de todos, puede variar entre 400 y 800 m³/h, para hacer más realista las condiciones operacionales.

En ambas instancias del caso de estudio, la duración del horizonte de planeación es de 660 h, y el "schedule" detallado óptimo se debe obtener a partir de 49 operaciones de entregas agregadas (ver Figura V.10).

Cuando se impone la hipótesis que permite la atención simultánea de terminales con operaciones multi-corte, en lugar de una única entrega por corrida, se espera que el número de operaciones de bombeo requeridas para llevar a cabo el plan agregado tienda a disminuir. Además, conviene recordar que la solución óptima hallada cuando sólo se permiten entregas simples, también pertenece a la región factible de la formulación con entregas múltiples. Por lo tanto, una cota superior para el valor de $|K|$ está dada por el número de operaciones requeridas en la mejor solución con entregas simples reportada en el capítulo anterior (ver Figura IV.10). De este modo, la elección de partida para $|K|$ es 53. Similarmente, $|K_i|$ se calcula como el número de operaciones de corte requeridas para inyectar cada lote i en la solución óptima hallada para el modelo de entrega simples. Luego, $|K_i| = \{6, 10, 1, 8, 3, 5, 3, 15, 2\}$ para el subconjunto de corridas de bombeo de los lotes $B6$ a $B14$, respectivamente. Es de esperar que cuando se permiten entregas simultáneas, la solución óptima requiera un menor número de operaciones de corte para cumplimentar el plan agregado de entregas de productos a terminales. En consecuencia, es muy probable que aparezcan operaciones ficticias al final de los subconjuntos K_i en la primera resolución del modelo de entregas múltiples. De este modo, la solución óptima se obtendría resolviendo una sola vez la formulación MILP propuesta.

V.5.2.1 Ejemplo V.2A

En el Ejemplo V.2A, el caudal está acotado en el rango $[0 - 1200 \text{ m}^3/\text{h}]$ para todos los segmentos del poliducto, y el modelo propuesto selecciona el caudal más conveniente para cada tramo, a lo largo del horizonte de tiempo. Tal como se mencionara anteriormente, la inyección agregada de un lote i en el origen del poliducto se descompone en una secuencia de operaciones de corte en el nivel desagregado, cada una de las cuales inyectará una porción del lote i dentro de la línea. Como el caudal de inyección en el nivel agregado está en el intervalo $[800 - 1200 \text{ m}^3/\text{h}]$, la velocidad del flujo en el primer tramo del poliducto puede cambiar durante dos operaciones consecutivas que inyectan el mismo lote, pero nunca puede ser menor a $800 \text{ m}^3/\text{h}$ ni mayor a $1200 \text{ m}^3/\text{h}$. Sin embargo, el caudal de bombeo promedio tiene que ser igual al caudal de bombeo "agregado" para dicho lote.

El "schedule" detallado obtenido resolviendo la formulación MILP propuesta cuando se permiten entregas simultáneas para el Ejemplo V.2A se muestra en la Figura V.11. La mejor solución fue hallada en 6.04 s de tiempo de CPU, significativamente menor que el tiempo empleado para resolver el modelo de entregas simples (2261.5 segundos), reportado en el capítulo anterior (ver Tabla IV.2). Como el problema de planeación involucra los niveles agregado y detallado, el tiempo de CPU antes mencionado debe sumarse al tiempo requerido para resolver el plan agregado en el nivel superior aplicando la formulación propuesta por Cafaro y Cerdá (2008). Descontando las operaciones ficticias, el tamaño del modelo muestra un decrecimiento significativo en el número de variables continuas y restricciones (ver Tabla V.7).

Tabla V.7. Comparación de resultados del Ejemplo V.2, utilizando diferentes políticas de entrega y rangos de variación de caudal

Política de Entrega	Rango de Caudal Admisible	Op.de corte $ K $	Volumen Activado $[10^2\text{m}^3]$	Costo Total $[\$]$	Tiempo de CPU $[s]$	Vbles. Cont.	Vbles. Bin.	Ecs.
Múltiple	Relajado (Ejemplo V.2A)	33	1905	52050	6.04	12716	478	5651
Múltiple	Restringido (Ejemplo V.2B)	40	5845	98450	124.9	15312	567	6725
Simple	Relajado (MILP IV.4)*	53	8350	136500	2261.5	18729	481	6423

*Solución hallada con el MILP – ND presentado en el Capítulo IV, suponiendo que el poliducto está en reposo al comienzo del horizonte de planificación

De la Figura V.11, se observa que 33 operaciones detalladas son planificadas en la solución óptima, 25 de las cuales realizan entregas simultáneas. Más aún, 20 operaciones multi-corte despachan sendos productos a un par de depósitos, y las restantes cinco corridas entregan productos a tres terminales en paralelo (corridas $k = 9, 15, 16, 21,$ y 29 en la Figura V.11). Además, el plan detallado comprende un total de 63 derivaciones a terminales (flechas verticales en la Figura V.11, simbolizando despachos de combustibles a depósitos). Para mantener un caudal finito a través de toda la línea durante la mayor parte del tiempo, los depósitos finales $D4$ y $D5$ reciben una mayor cantidad de entregas parciales.

Como se supone que al inicio de la operación el poliducto está en reposo, el volumen total activado sobre todo el horizonte de operación es $1905 [10^2 \text{ m}^3]$: 1500 unidades se ponen en movimiento durante la primera operación

multi-corte para activar los segmentos *Refinería-D1*, *D1-D2*, *D2-D3*, y *D3-D4*, mientras las 405 unidades volumétricas remanentes provienen de tres activaciones del último segmento *D4-D5*, es decir $3 \times 135 \cdot 10^2 \text{ m}^3$. Entre el origen de la línea y el depósito *D4* no se prevén detenciones del flujo, hasta la última corrida. Como se muestra en la Figura V.11, solamente hay dos detenciones temporarias en el último segmento de la tubería *D4-D5* durante los intervalos de tiempo [183.00 – 239.25 h] y [384.00 – 442.00 h]. La flechas rojas horizontales orientadas hacia la izquierda, en las operaciones $k=11$ y $k=17$, representan las detenciones de los segmentos, mientras que las flechas verdes con orientación hacia la derecha sobre las líneas de $k=14$ y $k=21$ provienen de las reactivaciones de flujos en el segmento *D4-D5*.

Comparando la solución para el Ejemplo V.2A, obtenida a través del nuevo enfoque propuesto, con los resultados hallados usando la formulación de entregas simples, presentados en el capítulo anterior, se concluye que la nueva formulación es mucho más eficiente (ver Tabla V.7). Con el nuevo enfoque, son suficientes 33 corridas de bombeo para cumplir con los requerimientos del plan agregado; es decir, 20 operaciones menos que las necesarias con entregas simples. El costo total de operación es de \$ 52050, tres veces inferior al costo operativo del enfoque anterior que alcanzaba los \$ 136500. Respecto al volumen activado, también se obtiene una significativa reducción (de 8350 a 1905 [10^2 m^3]) activando 7 segmentos contra 29 de la solución hallada considerando entregas simples.

En la Figura V.12, se compara el volumen activado en cada sección del poliducto cuando se aplican los enfoques de entregas simples y múltiples. El área entre ambos perfiles es una medida de los costos ahorrados por llevar a cabo la política de entregas simultáneas.

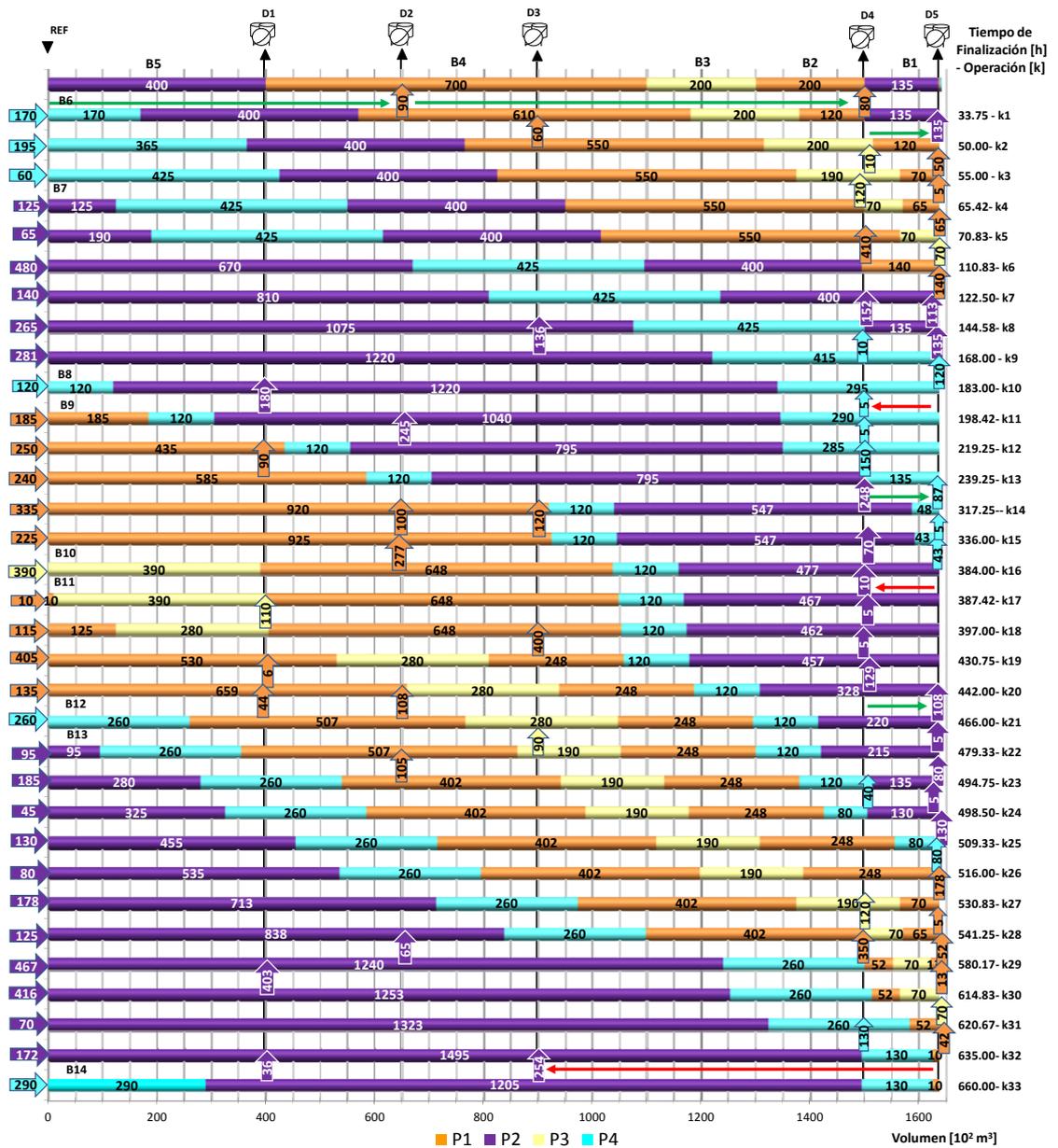


Figura V.11. "Schedule" Óptimo considerando entregas múltiples para el Ejemplo 2A

Hasta el momento no se ha impuesto un límite inferior al caudal de operación en los segmentos activos. Como resultado, el programa detallado que cumplimenta el plan agregado minimizando los costos de encendido y apagado de bombas así como las activaciones de segmentos, lleva a cabo la ejecución de entregas a un caudal muy bajo, especialmente en las derivaciones a los dos depósitos más lejanos (D4 y D5). De esta manera se

evitan detenciones temporarias y nuevas reactivaciones del flujo en los segmentos más alejados.

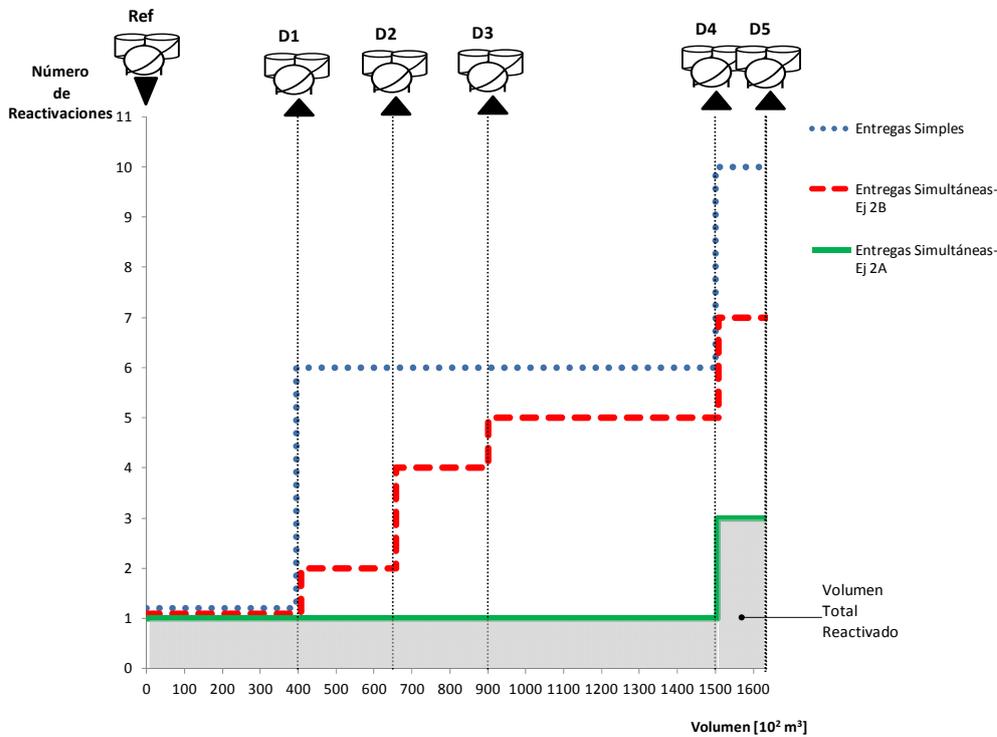


Figura V.12. Volumen activado acumulado para el Ejemplo V.2, usando diferentes políticas de entregas

El perfil temporal de caudales a lo largo del poliducto se muestra en la Figura V.13. Aproximadamente, la mitad de las derivaciones de producto al depósito D5 (11 entregas de 24) se realizan a un caudal menor a 400 m³/h. En la práctica, es una situación no deseada ya que ese bajo caudal aumenta el tamaño de las interfases entre lotes consecutivos, y las estaciones de bombeo operan de manera poco conveniente. Se puede observar que el resto de los segmentos también operan a velocidades de flujo bajas por períodos de tiempo limitados. Para evitar este tipo de operaciones de multi-corte, se establece un caudal mínimo de operación para cada sección activa del poliducto en el Ejemplo V.2B.

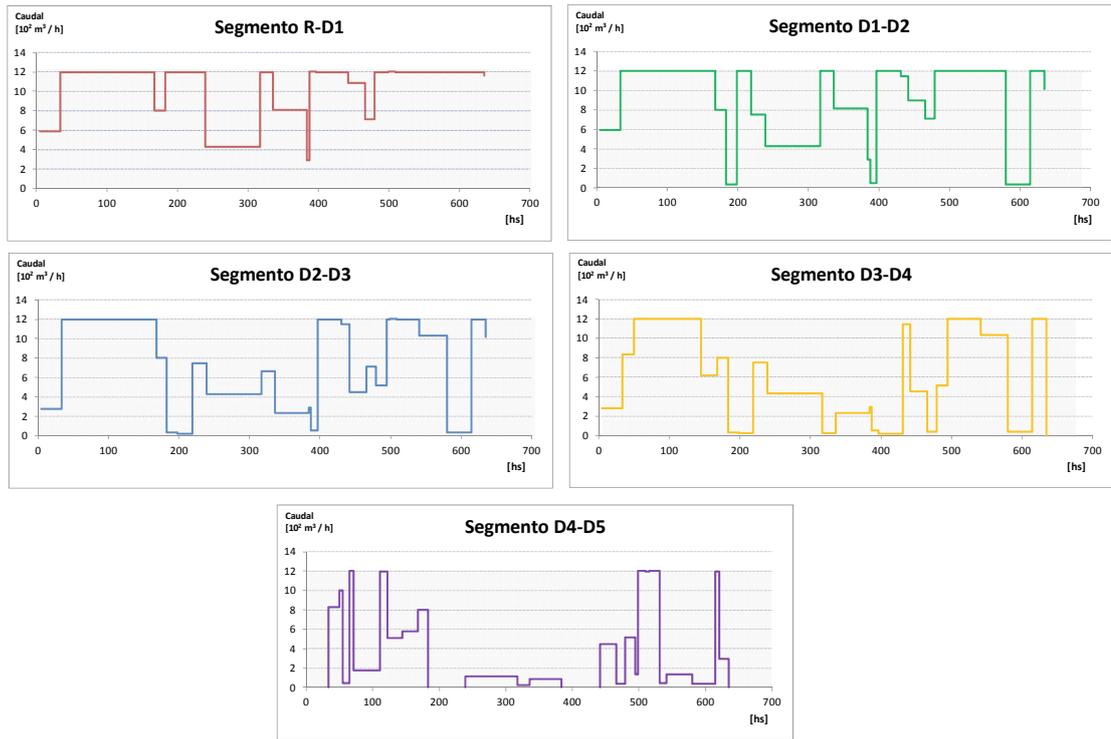


Figura V.13. Variación del caudal con el tiempo en cada segmento de la tubería para el Ejemplo V.2A

V.5.2.2 Ejemplo V.2B

Se reconsidera el mismo caso de estudio resuelto en la sección anterior, pero modificando los rangos admisibles de caudales. En efecto, se especifica un rango para cada segmento del poliducto (ver Tabla V.8). En la Figura V.14 se muestra la solución óptima del Ejemplo V.2B obtenida resolviendo el modelo MILP propuesto. Dicha solución se obtuvo en 124.9 s de tiempo de CPU, veinte veces menor que el tiempo empleado para resolver el modelo de entregas simples presentado en el Capítulo IV (Ver Tabla V.7). La solución óptima establece la ejecución de 40 operaciones de bombeo a realizarse a lo largo del horizonte de tiempo, 22 de las cuales realizan entregas simultáneas de productos refinados desde lotes en tránsito a más de un depósito. Por lo tanto, crece el número total de operaciones de 33 a 40 y disminuye el número de operaciones multi-corte

de 25 a 22 al especificarse un rango admisible de caudales por tramo. En particular, la cuarta corrida de bombeo (es decir, $k = 4$, que se extiende desde la hora 45.00 hasta las 55.00 h) es la única que descarga productos desde tres lotes diferentes a igual número de terminales (ver línea 5 de la Figura V.14). Las demás operaciones multi-corte realizan operaciones de entregas simultáneas a sólo dos depósitos en paralelo.

Tabla V.8. Rango admisible de caudal para cada segmento (Ejemplo V.2B)

Segmento de la Tubería	Rango de Caudal (m ³ /h)
Refinería – Terminal D1	700 – 1200
Terminal D1 – Terminal D2	600 – 1200
Terminal D2 – Terminal D3	600 – 1200
Terminal D3 – Terminal D4	600 – 1200
Terminal D4 – Terminal D5	400 – 800

El número de segmentos activos también cambia debido a la imposición del caudal mínimo. En este último caso hay 19 activaciones de segmento contra 7 en el Ejemplo V.2A. Más aún, se genera un número mayor de reanudaciones de flujo en cada segmento de la tubería, excepto en el primero de ellos. Estos se distribuyen de la siguiente manera: *Refinería-D1* [1], *D1-D2* [2], *D2-D3* [4], *D3-D4* [5], y *D4-D5* [7], (entre corchetes se indica la cantidad de reactivaciones del segmento relacionado). Dichas reactivaciones involucran un volumen total activado dado por: $(1 \times 400 + 2 \times 250 + 4 \times 250 + 5 \times 600 + 7 \times 135) = 5845$ unidades de volumen.

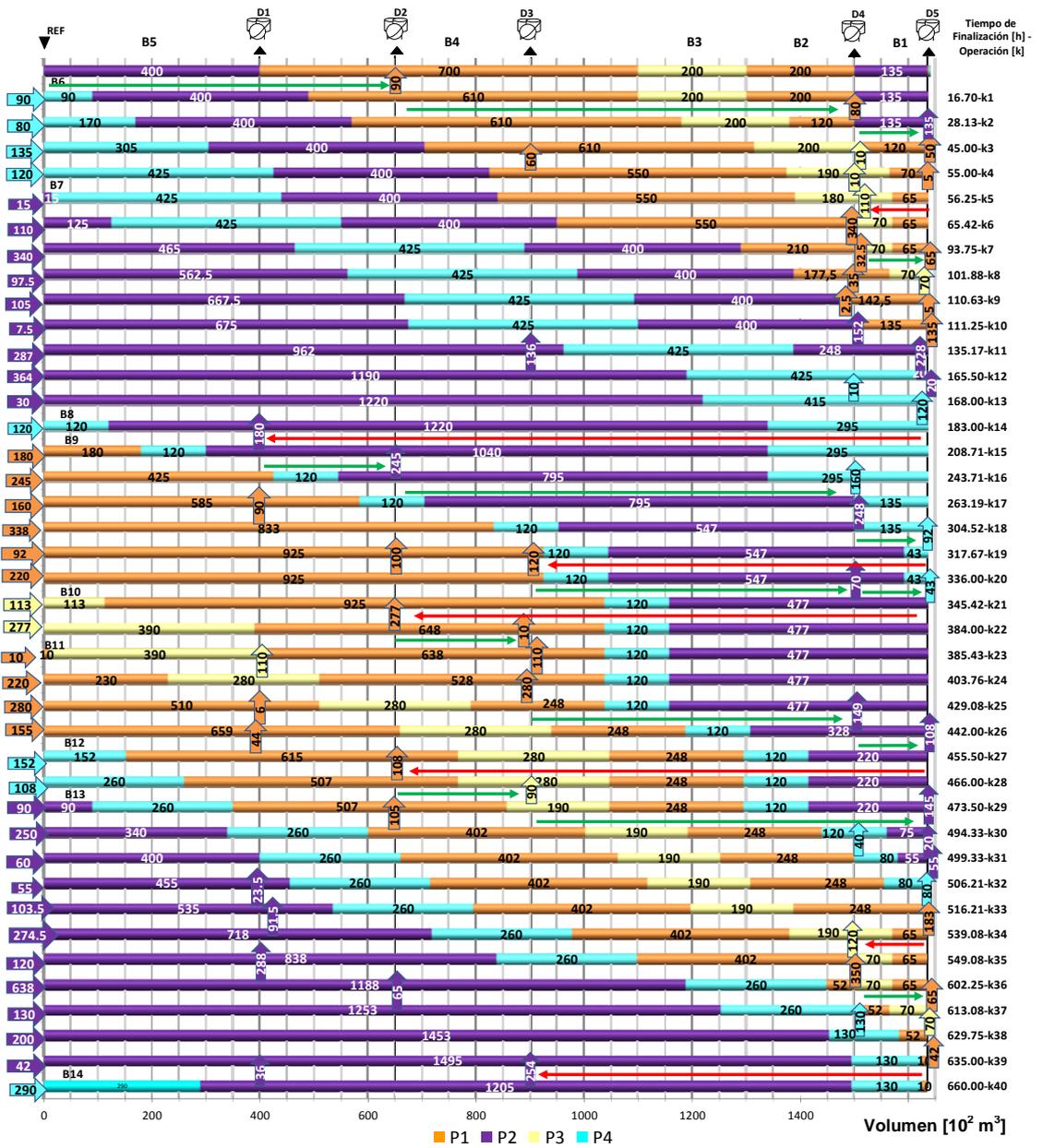


Figura V.14. "Schedule" Detallado óptimo para el Ejemplo V.2B bajo restricciones en el caudal

La Figura V.15 muestra la variación del caudal con el tiempo en cada segmento del poliducto.

El caudal presenta mayor estabilidad en cada sección, respecto al ejemplo anterior, pero el número de detenciones es superior. La mayor cantidad de detenciones se observa en los últimos tres segmentos. Como era de

esperar, el segmento con el mayor caudal promedio (1042 m³/h) y sólo una detención es el primero de ellos (Refinería–D1). Si no se tienen en cuenta los intervalos de tiempo de inactividad, el caudal promedio más bajo (690 m³/h) se observa en el segmento más alejado (D4–D5). Dicha sección opera 251.77 h de las 660 h, y presenta siete detenciones temporarias.

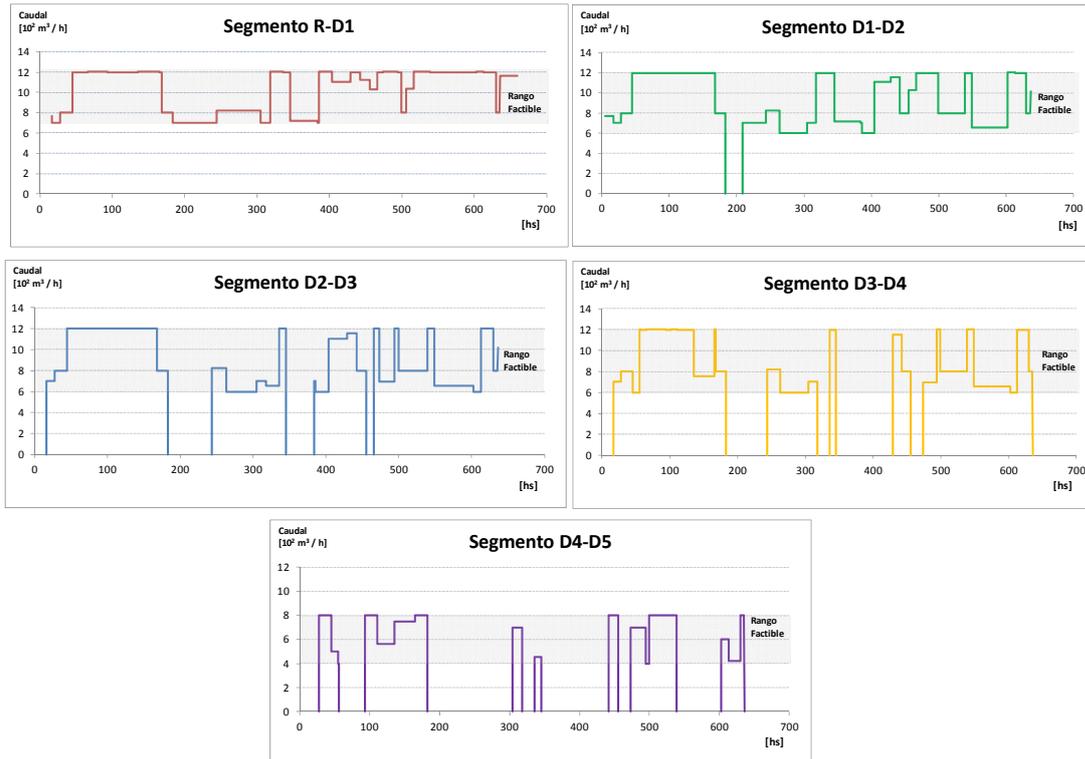


Figura V.15. Variación del caudal con el tiempo en cada segmento de la tubería (Ejemplo V.2B)

V.6. CONCLUSIONES PRELIMINARES

Queda demostrado que la formulación matemática de tiempo continuo representa una herramienta de gran utilidad para la obtención de planes eficientes de inyección y entrega a ser implementados por los operadores de poliductos. Más aún, el problema de planeación operativa de poliductos puede resolverse mediante un procedimiento jerárquico de dos etapas. En la etapa superior, usando un modelo continuo de tipo lineal mixto entero (MILP) se obtiene el plan "master", que indica las entregas a realizar desde

lotes en tránsito a cada depósito, mientras se inyecta un nuevo lote. Posteriormente, dicho plan "master" o agregado es refinado para desarrollar el "schedule" detallado de operaciones de corte. En el nivel inferior, se debe decidir a cerca de: (a) la cantidad y tamaño de los cortes a realizar para cumplir con las entregas agregadas planificadas, mientras se inyecta cada "batch", y (b) el orden de ejecución de dichas operaciones desagregadas de inyección/entrega.

En este capítulo se ha presentado una nueva formulación MILP de tipo continua para obtener el programa de operaciones detalladas de un poliducto con una única fuente transportando un conjunto de productos derivados del petróleo hacia múltiples terminales de distribución. Este es el primer enfoque continuo que imita el real funcionamiento de las operaciones de un poliducto, en una línea con una única fuente y varias terminales receptoras, realizando entregas parciales de productos a depósitos intermedios mientras el flujo remanente continua en movimiento a un caudal menor aguas abajo. Incorporando esta alternativa de operación, se logra reducir el número de detenciones y activaciones de los segmentos del poliducto. Como resultado, se obtienen importantes ventajas económicas en los costos de operación y mantenimiento de las bombas. Tal característica operativa es muy difícil de modelar utilizando formulaciones discretas.

Además, el modelo propuesto es capaz de mantener el caudal dentro de un rango definido para cada segmento del poliducto. Esto puede lograrse a través de un apropiado ajuste del tamaño de las entregas a las terminales intermedias.

A modo de ejemplo, se resolvieron dos instancias de un caso de estudio real empleando horizontes de tiempo diferentes (75 h y 660 h). Los

resultados obtenidos se comparan con los reportados en la literatura cuando sólo una entrega se permite por corrida de bombeo.

Para la primera instancia del caso de estudio considerando el horizonte de tiempo más corto, la estrategia continua multi-entrega, genera un programa de operaciones detalladas que reduce prácticamente a la mitad el volumen total reactivado y el número de operaciones requeridas, si se compara con la solución provista por la formulación discreta (Rejowski y Pinto, 2004). Más aún, el tamaño del modelo se reduce significativamente y por tanto el tiempo total de CPU para resolver las dos etapas jerárquicas del enfoque continuo es cercano a los 0.37 s.

La segunda instancia del caso de estudio que involucra el horizonte de tiempo más largo, ilustra claramente las ventajas de realizar entregas múltiples de producto a varias terminales, en lugar de hacerlo a una única terminal por vez. En este caso, el tiempo de CPU se reduce aproximadamente 375 veces, el número de corridas desagregadas cae de 53 a 33, y el volumen total reactivado disminuye por un factor de 4.5. Para ejemplificar la habilidad del modelo para manejar una velocidad de flujo específica en cada segmento del poliducto, se introduce una variante de la segunda instancia del caso de estudio resuelto. Tratando de evitar flujos con velocidades muy bajas en alguno de los segmentos activos durante una corrida de bombeo, se impone un mínimo caudal que cambia para cada segmento. Los resultados muestran que el caudal de operación se mantiene dentro del rango especificado para cada segmento a expensas de un mayor número de operaciones, mientras que los ahorros en tiempo de CPU y costos de operación son significativos respecto a la formulación de entregas simples.

Capítulo VI

PROGRAMACIÓN DETALLADA DE POLIDUCTOS CON MÚLTIPLES FUENTES

Modelado Matemático

VI.1 INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante del problema de programación detallada de poliductos es su estructura. Hasta aquí se abordaron configuraciones de poliductos simples. Un poliducto de estructura simple transporta productos desde una única estación de entrada a múltiples terminales de destino y opera en un solo sentido ("flujo uni-direccional"). Sin embargo, a menudo, un número de tuberías individuales están interconectadas entre sí formando una red. Poliductos en red incluyen más de un punto de inyección (múltiples terminales de ingreso) y más de un punto de descarga (múltiples terminales de recepción o distribución). El presente capítulo presenta una formulación rigurosa de tipo continua para hallar el programa detallado de operaciones para poliductos con múltiples fuentes, considerando la ejecución de inyecciones en paralelo desde más de una estación de entrada

y entregas simultáneas a varios depósitos. El objetivo del problema, como en capítulos anteriores, es minimizar el volumen total cuyo movimiento es reactivado y los costos de mantenimiento de las bombas impulsoras asociado al encendido/apagado de las mismas. Luego de definir el modelo matemático, se procederá a resolver dos ejemplos a los efectos de analizar la calidad y ventajas computacionales de la metodología propuesta.

VI.2. ILUSTRACIÓN DEL REFINAMIENTO DEL PLAN AGREGADO DE UN POLIDUCTO CON MÚLTIPLES FUENTES

La Figura VI.1 describe un sistema de poliductos con una estación de inyección en el origen (N1), una estación intermedia de doble propósito (N2), y una terminal de recepción (N3). De los tres nodos logísticos, N1 es una estación de inyección pura, N2 es un nodo que puede inyectar y recibir producto, mientras que N3 sólo puede tomar producto desde la línea. El caudal en los dos segmentos (N1–N2 y N2–N3) se ha fijado en 200 unidades por hora.

El plan agregado incluye un bloque con dos operaciones de inyección de sendos lotes de productos durante el intervalo de tiempo [0 h, 5 h]. Tal como se muestra en la segunda línea de la Figura VI.1A, dichas inyecciones ocurren en simultáneo: (a) 800 unidades de producto P1 provenientes del nodo N1, y (b) la inyección de 1000 unidades de P5 desde el nodo dual N2. Al mismo tiempo, se deben completar las siguientes tres entregas: el nodo N2 recibe 800 unidades de producto P2, mientras que el nodo N3 se abastece con 800 unidades de producto P3 y 200 unidades de P1.

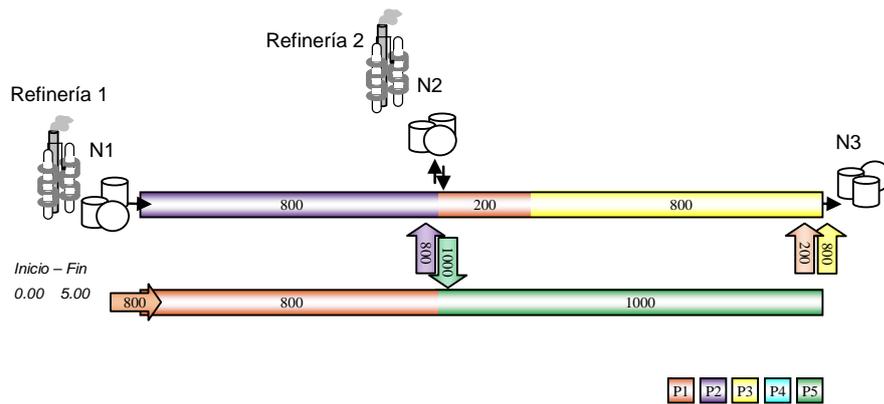


Figura VI.1A. Configuración del poliducto y plan agregado a refinar

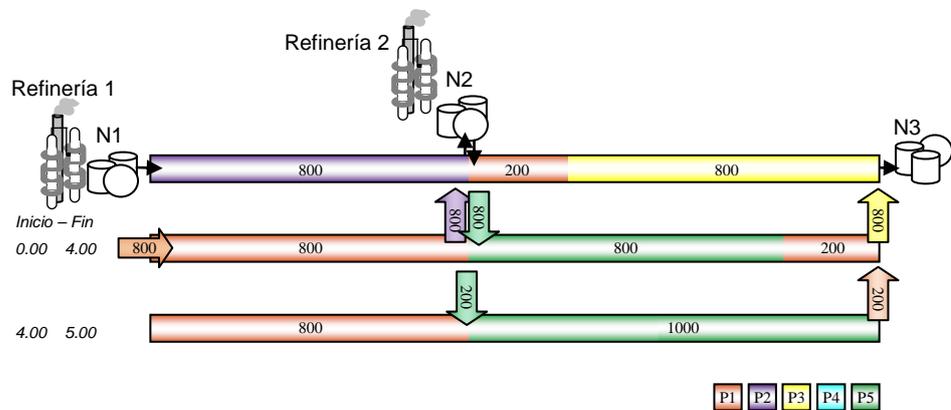


Figura VI.1B. Serie detallada de operaciones resultantes del proceso de desagregación

A fin de obtener el programa detallado de trabajo, el bloque de inyecciones y entregas agregadas se debe desagregar en una serie de operaciones de corte. En el problema propuesto, una operación simple puede involucrar la inyección de más de un lote al mismo tiempo, y a cada instante el poliducto estará caracterizado por un estado particular de válvulas y bombas impulsoras. Las válvulas pueden estar abiertas o cerradas y las bombas encendidas o apagadas. En efecto, a lo largo de cada operación detallada se debe cumplir que tanto el producto inyectado como el caudal en cada fuente permanezcan sin cambios; lo mismo debe

ocurrir con el lote que se descarga y su velocidad de derivación a cada depósito activo.

Como resultado, el plan agregado presentado en la Figura VI.1A es desagregado en una secuencia de dos operaciones detalladas (ver Figura VI.1B). La operación inicial se realiza a lo largo de las primeras cuatro horas. En ese período, el segmento N1–N2 se activa, inyectando 800 unidades de P1 desde el nodo N1, que empujan la misma cantidad de P2 fuera de la línea al nodo N2. Simultáneamente, 800 unidades de P5 se inyectan en el nodo N2 desplazando todo el lote de producto P3 hacia la terminal N3. Si bien se trata de una operación desagregada simple, ocurren dos inyecciones en simultáneo y cada una de ellas produce un despacho de producto a un nodo receptor.

A la hora $t=4$ h, cambia el estado de válvulas y bombas impulsoras, y una nueva operación se ejecuta. Las bombas en la estación de inyección N1 se apagan, y las válvulas de entrada a la terminal N2 se cierran. Más aún, ocurren los siguientes dos eventos: (a) el fluido en el segmento N1–N2 se detiene y (b) la terminal N3 comienza a recibir un nuevo producto (P1). Por lo tanto, el tanque receptor del nodo N3 también cambia. Se cierra la válvula de acceso al tanque de almacenaje de P3 y se abre la correspondiente al tanque dedicado al producto P1. Así, durante la segunda operación detallada que se ejecuta desde $t=4$ h hasta $t=5$ h, el único segmento activo es N2–N3 al inyectarse 200 unidades de P5 desde el nodo dual N2 y derivarse la misma cantidad de P1 al nodo N3.

VI.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Para abordar el problema de "scheduling" detallado de operaciones de corte en poliductos con múltiples fuentes de inyección de productos, se propone

una formulación matemática de tiempo continuo basada en las siguientes hipótesis:

- (a) Se considera un poliducto unidireccional compuesto por múltiples terminales de inyección y recepción.
- (b) El sistema de poliducto transporta líquidos incompresibles.
- (c) Se encuentra disponible el plan agregado obtenido a través de un enfoque de tiempo continuo.
- (d) Se permite la inyección en simultáneo de productos desde diferentes fuentes, siempre que las corridas de bombeo no interactúen entre sí.
- (e) Durante una operación de corte cualquiera, la derivación de producto hacia una dada terminal es causada por la inyección de un sólo lote. Es decir, se admite la ejecución de bloques de corridas no-interactivas.
- (f) La inyección de un lote puede producir entregas simultáneas de producto a más de un depósito receptor. Es decir, pueden ejecutarse operaciones multi-corte.
- (g) Las entregas simultáneas que ocurren durante una operación desagregada deben transcurrir durante el intervalo de tiempo previsto en el plan agregado. Es decir, ninguna de ellas puede demorar su inicio una vez que la operación de corte ha comenzado, ni ser interrumpida antes de completar la operación. En otras palabras, las válvulas de entrada de los tanques receptores de las terminales activas permanecen abiertas desde el principio hasta el final de la operación de corte.
- (h) Una terminal activa sólo puede recibir producto desde un único lote durante cada operación de corte.

- (i) El caudal en cada segmento de la tubería se mantiene en el mismo valor durante toda la operación.
- (j) Se especifica un caudal admisible para cada segmento. Generalmente, varía con el diámetro de la tubería y el número de terminales aguas abajo.
- (k) Los costos de energía y de mantenimiento dependen tanto del volumen total de las secciones del poliducto donde el flujo es reactivado, como del número de operaciones de encendido/apagado de las bombas.

VI.4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El modelo matemático que se desarrolla a lo largo del presente capítulo para abordar el problema de "scheduling" detallado de operaciones en poliductos con múltiples fuentes, permite la ejecución de inyecciones en paralelo de lotes que no interactúan entre sí, y la entrega simultánea de productos a las terminales de distribución en cada operación de corte. En otras palabras, dos o más estaciones de entrada pueden concurrentemente insertar lotes nuevos en la línea y al mismo tiempo múltiples depósitos pueden estar recibiendo en forma simultánea algún producto desde los lotes en tránsito. Durante una operación de inyección combinada, el número de entregas de productos en paralelo puede ser mayor que el número de inyecciones simultáneas. En otras palabras, una inyección puede causar múltiples entregas de producto a múltiples terminales. Sin embargo, cada entrega es causada por una única inyección y una terminal activa puede recibir producto desde como máximo un lote en tránsito durante una operación de corte. El modelo propuesto puede considerar también nodos

de doble propósito (fuente y receptor), llamados así porque pueden recibir e inyectar productos durante la misma operación desagregada.

VI.4.1 Principales conjuntos del problema

El modelo matemático se formula en términos de seis conjuntos principales:

- (a) terminales del poliducto $j \in J = \{j_0, j_1, j_2, \dots\}$, incluyendo estaciones de inyección, recepción y doble propósito;
- (b) segmentos del poliducto $J' = J - \{j_0\} = \{j_1, j_2, \dots\}$, donde el segmento j conecta las terminales $j-1$ y j ;
- (c) lotes $i \in I$ en movimiento a través de la tubería durante el horizonte de planeación;
- (d) bloques de inyecciones en paralelo ordenados cronológicamente $b \in B$ especificados en el plan agregado;
- (e) inyecciones individuales de lotes $r \in R$ previstas en el plan agregado;
- (f) operaciones detalladas $k \in K_b, b \in B$ representado la secuencia de acciones desagregadas a ser realizadas por el operador del poliducto a lo largo del horizonte de planeación durante la inyección del bloque b para dar cumplimiento a la programación agregada. El número de operaciones detalladas ($|K|$) no se conoce de antemano, pero puede ser estimado mediante un procedimiento simple, que se presenta al final de esta sección.

La Figura VI.2 muestra una tubería troncal que transporta lotes de productos que pueden ser inyectados desde una refinería (j_0) ubicada en el origen o desde un nodo intermedio j_1 hacia las terminales de recepción $\{j_1, j_2, \dots, j_n\}$. El poliducto puede ser visto como si estuviera compuesto por una

cadena de segmentos $J' = \{j_1, j_2, \dots, j\}$ con el segmento j conectando el nodo $(j-1)$ con el nodo j . Note que el mismo subíndice identifica tanto el segmento como el nodo ubicado en su extremo posterior.

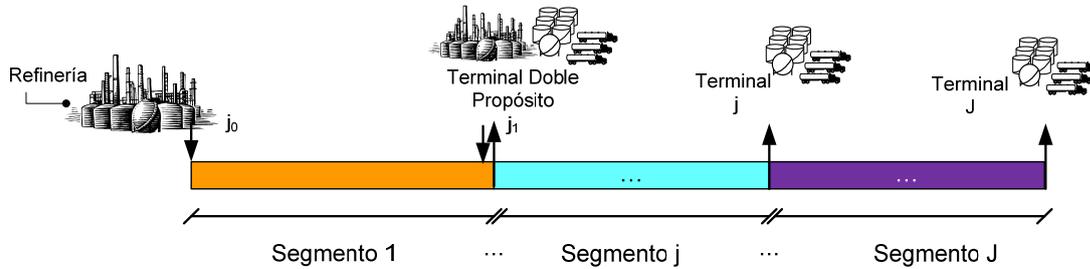


Figura VI.2. Ilustración de la nomenclatura a utilizar

Las estaciones de doble propósito son terminales intermedias localizadas a lo largo de la tubería que pueden inyectar nuevos lotes y/o recibir productos desde lotes en tránsito inyectados en estaciones ubicadas aguas arriba. La información extraída desde el plan agregado puede ser incorporada a la formulación matemática del problema de una manera sencilla a través de la definición de algunos subconjuntos adicionales. Ellos son:

- Las inyecciones agregadas $r \in R_b \subset R$ que pertenecen al bloque $b \in B$, y son simultáneamente ejecutadas desde diferentes terminales de entrada

- Las terminales $j \in J_r^\oplus \subset J$ que pueden recibir productos durante la inyección agregada r , dada por $J_r^\oplus = \left\{ j \in J \mid \sum_{i \in I} dd_{i,j}^{(r)} > 0 \right\}$. El

parámetro $dd_{i,j}^{(r)}$ es un dato del problema y representa la cantidad total de producto a transferir desde el lote $i \in I$ a la terminal j durante la corrida individual r prescrita en el plan agregado.

- El subconjunto de depósitos $j \in \hat{J}_{i,r}^{\oplus} \subset J_r^{\oplus}$ recibiendo una porción de lote i mientras se ejecuta la inyección individual r .
$$\hat{J}_{i,r}^{\oplus} = \{j \in J_r^{\oplus} \mid dd_{i,j}^{(r)} > 0\}.$$
- Los lotes $i \in I_b \subset I$ en movimiento a través del poliducto durante la ejecución del bloque de inyecciones agregadas $b \in B$.
- La sucesión de segmentos $j \in J_r \subseteq J'$ que conectan la estación de inyección con el destino más alejado durante la corrida de bombeo r .
- El subconjunto de operaciones desagregadas $k \in K_b$ para cumplimentar al bloque de corridas b especificadas en el plan agregado. Durante una operación $k \in K_b$, pueden ocurrir tantas inyecciones simultáneas de lotes como corridas de inyección haya en el bloque b $|R_b|$. A su vez, un número de operaciones combinadas aún mayor que $|R_b|$ podría ser necesario.

Consideremos un poliducto transportando productos refinados que comprende un nodo de inyección "puro" (j_0), una terminal de doble propósito (j_1) y un depósito de recepción "puro" (j_2) como se muestra en la parte superior de la Figura VI.3.

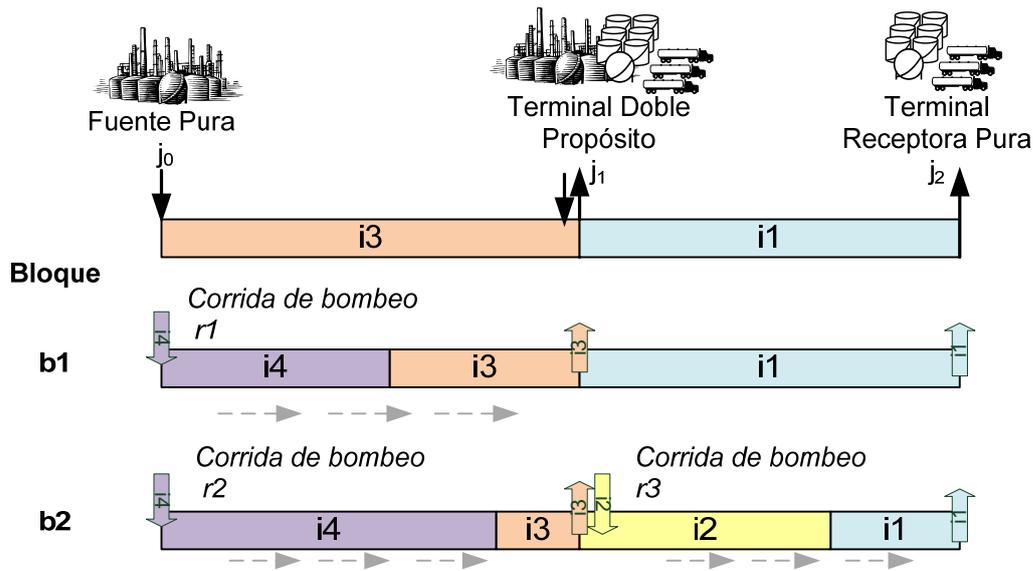


Figura VI.3. Planificación agregada incluyendo corridas de inyección combinadas

Cuando se ejecuta el bloque b_1 que comprende una corrida de inyección simple (r_1), un nuevo lote i_4 se inyecta desde la terminal j_0 y una porción del lote i_3 se deriva desde la línea hacia el depósito j_1 . Así, $J_{r_1}^\oplus = \hat{J}_{i_3,r_1}^\oplus = \{j_1\}$. En el siguiente bloque b_2 , el poliducto opera siguiendo un esquema "particionado" porque dos inyecciones no conflictivas r_2 y r_3 se desarrollan en simultáneo. Durante la corrida r_2 , una porción adicional del lote i_4 ingresa a la línea para desviar otra porción del "batch" i_3 al depósito j_1 . Por otra parte, la corrida r_3 ingresa un nuevo lote i_2 desde la estación dual j_1 , para empujar una porción de lote i_1 al depósito j_2 . Por lo tanto, $J_{r_2}^\oplus = \hat{J}_{i_3,r_2}^\oplus = \{j_1\}$ y $J_{r_3}^\oplus = \hat{J}_{i_1,r_3}^\oplus = \{j_2\}$. Note que $\bigcap_{r \in R_b} J_r^\oplus = \emptyset$.

La cardinalidad de cada subconjunto K_b no se conoce de antemano pero una estimación conservativa de $|K_b|$ está dada por el número total de entregas agregadas durante la inyección del bloque de corridas b , es decir, $\sum_{r \in R_b} \sum_{i \in I_b} |\hat{J}_{i,r}^\oplus|$. Dicha estimación supone que cada corrida de bombeo, prescripta en el plan agregado, origina una única entrega de producto. Sin

embargo, más de una entrega simultánea a terminales podría ocurrir en alguna operación, si el bloque incluye dos o más corridas de bombeo en paralelo. Se pudo verificar que una mejor estimación está dada por:

$$\max_{r \in R_b} \left\{ \sum_{i \in I_b} |\hat{J}_{i,r}^{\oplus}| \right\}.$$

VI.4.2. Variables del modelo

A lo largo de este apartado se describen las principales variables binarias y continuas del modelo. Algunas de ellas guardan similitud con las variables consideradas en la formulación MILP introducida en el capítulo anterior para poliductos con una única fuente de inyección.

Variables binarias:

u_k denota la existencia de la operación desagregada k si $u_k=1$

$x_{i,j}^{(k)}$ expresa la ejecución de una operación de entrega de una porción del lote i al depósito j durante la operación k cuando $x_{i,j}^{(k)}=1$

Variables continuas:

$Q_{r,k}$ volumen de producto inyectado durante la operación k para complementar la corrida agregada $r \in R$

L_k duración de la operación k

C_k hora de finalización de la operación k

$D_{i,j}^{(k)}$ volumen desviado desde el lote en tránsito i a la terminal j durante la ejecución de la operación k

$W_i^{(k)}$ volumen del lote en tránsito i al tiempo de finalización de la operación k (C_k)

$F_i^{(k)}$ coordenada frontal del lote i al tiempo C_k

$AV_j^{(k)}$ volumen activado si el segmento j se pone en movimiento durante la operación k

$SV_j^{(k)}$ volumen detenido si el segmento j se vuelve inactivo durante la operación k

$\omega_j^{(k)}$ indica si el segmento j que conecta las terminales $(j-1)$ y j está o no activo durante la operación k . $\omega_j^{(k)} \in [0, 1]$

VI.4.3. Restricciones del problema

Las restricciones de la formulación propuesta pueden agruparse en cinco categorías:

(1) Restricciones que definen el volumen inyectado en cada estación de ingreso activa durante una operación $k \in K_b$ del bloque b , así como el tiempo y la duración de dicha operación para cumplir con lo estipulado en el plan agregado.

(2) Ecuaciones para monitorear el tamaño y localización de los lotes en tránsito a través de la tubería al tiempo de finalización de cada operación k .

(3) Restricciones controlando la factibilidad física y el tamaño de las entregas de productos a las terminales en cada operación $k \in K_b$ de modo que las entregas prescriptas para cada bloque b se cumplan.

(4) Restricciones para identificar los segmentos activos y detenidos en cada operación k .

(5) Restricciones determinando el volumen de flujo reactivado y detenido en cada operación k .

VI.4.3.1. Restricciones vinculadas con las operaciones de corte

Secuenciamiento de Operaciones. Una operación detallada de corte $k \in K_b$ relacionada con el bloque de corridas paralelas b , que posiblemente involucre múltiples inyecciones, nunca debe comenzar antes de que se complete la operación anterior $(k-1) \in K_b$:

$$C_k - L_k \geq C_{k-1} \quad \forall (k-1), k \in K_b, b \in B \quad (\text{VI.1})$$

Hora de inicio para la primera operación vinculada al bloque b. La primera operación detallada $k = \text{first}(K_b)$ del bloque b tiene que comenzar al tiempo especificado en el nivel agregado para dicho bloque:

$$C_k - L_k = st_b \quad \forall b \in B, k = \text{first}(K_b) \quad (\text{VI.2})$$

Tiempo de finalización de la última operación no-ficticia del conjunto K_b . La última operación detallada $k = \text{last}(K_b)$ del bloque b debe finalizar al tiempo de culminación especificado en la planificación agregada:

$$C_k = ft_b \quad \forall b \in B, k = \text{last}(K_b) \quad (\text{VI.3})$$

Rango admisible para la duración de una operación detallada k. Los parámetros del modelo l_{\min} y l_{\max} representan la duración mínima y máxima permitida para una operación detallada. Luego, la duración de una operación no-ficticia k debe pertenecer al rango dado por la ecuación (VI.4):

$$l_{\min} u_k \leq L_k \leq l_{\max} u_k \quad \forall b \in B, k \in K \quad (\text{VI.4})$$

La variable binaria $u_k = 1$ denota que la operación k existe. Para una operación k ficticia que nunca se ejecuta $u_k = 0$, y la ecuación (VI.4) vuelve su duración L_k nula.

Rango admisible para el volumen inyectado en la terminal de ingreso de la corrida $r \in R_b$ durante la operación $k \in K_b$ del bloque b . Los parámetros $vb_{\min}^{(r)}$ y $vb_{\max}^{(r)}$ denotan las tasas de inyección mínima y máxima para la terminal de ingreso activa durante la corrida individual $r \in R_b$. Entonces, el

volumen $Q_{r,k}$ inyectado en el poliducto durante la operación $k \in K_b$, correspondiente a la corrida agregada de bombeo r , debe limitarse al intervalo dado por la ecuación (VI.5):

$$\nu b_{\min}^{(r)} L_k \leq Q_{r,k} \leq \nu b_{\max}^{(r)} L_k \quad \forall b \in B, r \in R_b, k \in K_b \quad (\text{VI.5})$$

Si k es una operación ficticia, luego $Q_{r,k} = 0$ para todo $r \in R_b$ dado que $L_k = 0$ por (IV.4).

Las operaciones ficticias aparecen al final de cada conjunto K_b . Por la restricción (VI.6) de la formulación matemática del problema, las operaciones ficticias $k \in K_b$ del bloque $b \in B$ aparecerán siempre últimas en el conjunto K_b . Más aún, las operaciones ficticias del bloque b siempre terminarán al tiempo ft_b debido a las ecuaciones (VI.3) y (VI.4).

$$u_k \leq u_{k-1} \quad \forall b \in B, (k-1), k \in K_b (k > 1) \quad (\text{VI.6})$$

Cumplimiento de la planificación agregada. El volumen total inyectado desde la estación de entrada activa, durante la corrida r del bloque b , debe ser igual a la cantidad ingresada por la corrida r en el nivel agregado.

$$\sum_{k \in K_b} Q_{r,k} = qq_r \quad \forall b \in B, r \in R_b \quad (\text{VI.7})$$

VI.4.3.2. Seguimiento de lotes a través del poliducto

Relación entre la localización de dos lotes consecutivos al final de cada operación detallada. La coordenada frontal del lote $(i+1)$ al final de la operación k es igual a la coordenada inferior del lote predecesor $i \in I_b$ dado por $(F_i^{(k)} - W_i^{(k)})$, donde $W_i^{(k)}$ es el tamaño del lote i al tiempo C_k . En la

restricción (VI.8), el conjunto I_b incluye los lotes en tránsito, dentro de la tubería en, el intervalo $[st_b, ft_b]$.

$$F_{i+1}^{(k)} = F_i^{(k)} - W_i^{(k)} \quad \forall b \in B, i \in I_b, k \in K_b \quad (\text{VI.8})$$

Notar que las coordenadas de los lotes siempre están medidas desde el origen del poliducto. Justamente uno de los aspectos distintivos de los modelos continuos es el hecho de manejar una única escala de volumen.

Tamaño del lote i al final de la operación k . El tamaño del lote i al tiempo C_k puede ser computado considerando su valor $[W_i^{(k-1)}]$ al tiempo de finalización de la operación previa sumándole el volumen adicional inyectado de lote i a través de la operación k que resulta de refinar la corrida r y substrayéndole el volumen del lote i entregado a las terminales $j \in J$ ubicadas aguas abajo de la estación de inyección activa durante esa corrida. En la restricción (VI.9), el conjunto $\hat{J}_{i,r}^{\oplus}$ representa las terminales de distribución activas que reciben material desde el lote i aguas abajo de la estación de inyección activa de la corrida r . Más aún, la variable continua $D_{i,j}^{(k)}$ denota la cantidad de producto despachada a la terminal $j \in \hat{J}_{i,r}^{\oplus}$ desde el lote i durante la operación k ejecutada para cumplimentar la corrida individual r . El parámetro $a_{i,r}$ es igual a uno si el lote en tránsito i recibe una cantidad adicional de producto durante la corrida r .

$$W_i^{(k)} = W_i^{(k-1)} + \sum_{r \in R_b} \left[a_{i,r} Q_{r,k} - \sum_{j \in \hat{J}_{i,r}^{\oplus}} D_{i,j}^{(k)} \right] \quad \forall b \in B, i \in I_b, k \in K_b \quad (\text{VI.9})$$

Para $k = 1$, $W_i^{(k-1)}$ está dado por el volumen inicial del lote i , o sea w_{0i} .

VI.4.3.3. Restricciones para los despachos de productos

Cotas para el tamaño de las entregas de productos. La descarga de un producto desde el lote en tránsito i a la terminal j durante una operación detallada k es causada sólo por una de las corridas paralelas $r \in R_b$ del bloque b . Esto es debido a que $\bigcap_{r \in R_b} J_r^\oplus$ es un conjunto vacío dado que las corridas de un bloque involucran conjuntos disjuntos de terminales activas. Sin embargo, una corrida individual r puede causar entregas múltiples durante una operación detallada. Luego,

$$d_{\min} x_{i,j}^{(k)} \leq D_{i,j}^{(k)} \leq dd_{i,j}^{(r)} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall b \in B, i \in I_b, r \in R_b, j \in \hat{J}_{i,r}^\oplus, k \in K_b \quad (\text{VI.10})$$

La variable binaria $x_{i,j}^{(k)}$ vale uno si una porción del lote i se despacha hacia la terminal j en la operación k . Caso contrario, vale cero. El parámetro d_{\min} normalmente toma un valor positivo pequeño, mientras $dd_{i,j}^{(r)}$ representa la cantidad total de producto a transferir desde el lote i a la terminal j , a través de la corrida r , tal como lo indica el plan agregado.

Caudal máximo de descarga de producto en las terminales de recepción. Si $vd_{\max}^{(j)}$ denota el caudal máximo admisible para la entrega de un producto a la terminal j , luego se debe cumplir la restricción (VI.11).

$$D_{i,j}^{(k)} \leq vd_{\max}^{(j)} L_k \quad \forall b \in B, i \in I_b, r \in R_b, j \in \hat{J}_{i,r}^\oplus, k \in K_b \quad (\text{VI.11})$$

Operaciones ficticias. Durante una operación ficticia, caracterizada por $u_k = 0$, no puede haber entregas de productos a terminales. Además, se puede despachar producto desde un único lote a cada terminal activa durante la operación no-ficticia k ($u_k = 1$).

$$\sum_{i \in I_b} x_{i,j}^{(k)} \leq u_k \quad \forall b \in B, r \in R_b, j \in \hat{J}_r^{\oplus}, k \in K_b \quad (\text{VI.12})$$

Condiciones de factibilidad para la entrega de productos a terminales. La entrega de producto desde el lote i a la terminal j durante la operación k puede llevarse a cabo sólo si el lote i :

- (a) ha alcanzado la ubicación de la terminal j al final de la operación $(k-1)$, y
- (b) no ha superado la posición de la terminal j al final de la operación k para evitar la descarga del siguiente lote. Dichas condiciones de factibilidad son forzadas a través de las restricciones (VI.13) y (VI.14). El parámetro pv denota el volumen total del poliducto.

$$F_i^{(k-1)} \geq \sigma_j x_{i,j}^{(k)} \quad \forall b \in B, i \in I_b, r \in R_b, j \in \hat{J}_{i,r}^{\oplus}, k \in K_b \quad (\text{VI.13})$$

$$F_i^{(k)} - W_i^{(k)} \leq \sigma_j + (pv - \sigma_j)(1 - x_{i,j}^{(k)}) \quad \forall b \in B, i \in I_b, r \in R_b, j \in \hat{J}_{i,r}^{\oplus}, k \in K_b \quad (\text{VI.14})$$

Balance exacto entre el volumen ingresado y el volumen descargado en cada operación k . Las corridas paralelas $r \in R_b$ pertenecientes a un mismo bloque b producen movimiento de lotes y entregas de producto que nunca se superponen debido a que involucran diferentes segmentos de la tubería ($\bigcap_{r \in R_b} J_r = \emptyset$), y diferentes estaciones de inyección y recepción ($\bigcap_{r \in R_b} J_r^{\oplus} = \emptyset$)

Por lo tanto, para cada corrida individual $r \in R_b$ del bloque b , se introduce una ecuación de balance entre la cantidad total de producto inyectado desde las estaciones de entrada y el volumen total que egresa hacia las terminales de distribución en cada operación $k \in K_b$.

$$\sum_{i \in I_b} \sum_{j \in \hat{J}_{i,r}^{\oplus}} D_{i,j}^{(k)} = Q_{r,k} \quad \forall b \in B, r \in R_b, k \in K_b \quad (\text{VI.15})$$

Cumplimiento de las entregas desde lotes en tránsito a terminales previstas en el plan agregado. El volumen total desviado desde el lote $i \in I_b$ hacia la terminal $j \in J_{i,r}^{\oplus}$ a través de las operaciones vinculadas a la corrida individual $r \in R_b$ del bloque b debe ser igual a la entrega agregada prescrita $dd_{i,j}^{(r)}$. Conviene recordar que una sola corrida de bombeo puede producir la transferencia de un producto a una dada terminal activa mientras se ejecuta el bloque b , dado que se permiten inyecciones simultáneas que no interactúan.

$$\sum_{k \in K_b} D_{i,j}^{(k)} = dd_{i,j}^{(r)} \quad \forall b \in B, i \in I_b, r \in R_b, j \in \hat{J}_{i,r}^{\oplus} \quad (\text{VI.16})$$

VI.4.3.4. Identificación de segmentos activos y detenidos durante una operación multi-ingreso, multi-corte

Se define una variable continua $\omega_j^{(k)}$ que representa el estado del segmento del poliducto $j \in J'$ durante la operación k . El conjunto J' incluye sólo terminales receptoras. El valor $\omega_j^{(k)}$ está confinado al intervalo cerrado $[0, 1]$. El segmento j estará activo en la operación k si existe fluido en movimiento a través de él y consecuentemente $\omega_j^{(k)} = 1$. De otro modo, el segmento j estará detenido y $\omega_j^{(k)} = 0$. Para caracterizar el estado de un segmento del poliducto se incorporan las restricciones (VI.17) y (VI.18) para cada corrida individual $r \in R_b$ del bloque b .

$$\omega_j^{(k)} \geq \sum_{i \in I_b} x_{i,j}^{(k)} \quad \forall b \in B, r \in R_b, j \in J_r, j' \in J_r^{\oplus} (j' \geq j), k \in K_b \quad (\text{VI.17})$$

$$\omega_j^{(k)} \leq \left[\sum_{i \in I_b} \sum_{\substack{j' \in J_r^\oplus \\ j' \geq j}} x_{i,j'}^{(k)} \right] - u_k + 1 \quad \forall b \in B, r \in R_b, j \in J_r, k \in K_b \quad (\text{VI.18})$$

La ecuación (VI.17) impone que el segmento $j \in J_r$ está activo si existe entrega de producto a alguna terminal $j' \geq j$, con $j' \in J_r^\oplus$ representando una terminal activa durante la corrida r . Como se dijo anteriormente, la terminal $j' \in J_r^\oplus$ se ubica en el extremo derecho del segmento $j' \in J_r$. Más aún, el segmento j' está más alejado del origen del poliducto que el segmento j si $j' > j$. La entrega de producto hacia la terminal j mientras se ejecuta la operación k ocurre sólo si $x_{i,j}^{(k)} = 1$ para algún lote $i \in I_b$. Además, una terminal de recepción activa j' durante una corrida individual $r \in R_b$ presenta $dd_{i,j}^{(r)} > 0$ para al menos algún lote $i \in I_b$. Por otra parte, la restricción (VI.18) indica que el segmento $j \in J_r$ está detenido si no hay entrega de producto hacia ninguna terminal $j' \geq j$ durante la operación no ficticia k . Asimismo, los segmentos del poliducto que no pertenecen al conjunto de terminales activas durante la ejecución del bloque b , J_b , también estarán detenidos en cada operación $k \in K_b$ de ese bloque, como establece la ecuación (VI.19).

$$\omega_j^{(k)} = 0 \quad \forall b \in B, j \notin J_b, k \in K_b \quad (\text{VI.19})$$

$$\text{donde: } J_b = \bigcup_{r \in R_b} J_r$$

Para las operaciones ficticias con $u_k = 0$ ubicadas últimas en el conjunto K_b , las restricciones (VI.17) y (VI.18) son redundantes. Para evitar soluciones simétricas, es importante que el valor de $\omega_j^{(k)}$ para las operaciones ficticias mantenga el estado del segmento j durante la última operación detallada no

ficticia. Esto se puede lograr incorporando la restricción (VI.20) al modelo del problema, que es redundante cuando $u_k = 1$. En otras palabras, se cumplirá que $\omega_j^{(k)} = \omega_j^{(k-1)}$ para cualquier operación k ficticia.

$$\omega_j^{(k-1)} - u_k \leq \omega_j^{(k)} \leq \omega_j^{(k-1)} + u_k \quad \forall b \in B, (k-1), k \in K_b, j \in J \quad (\text{VI.20})$$

Control del caudal en cada segmento del poliducto. El caudal en cada segmento activo j con $\omega_j^{(k)} = 1$ debe pertenecer a un rango admisible dado por $[vb_{\min}^{(j)}; vb_{\max}^{(j)}]$. El volumen total que fluye a través de un segmento activo j durante la operación k se computa sumando todas las derivaciones de productos a la terminal j y a terminales aguas abajo de la terminal j ; es decir, para $j' \in J_r^\oplus$ (con $j' \geq j$) durante la operación k .

$$vb_{\min}^{(j)} L_k - q_{\max} (1 - \omega_j^{(k)}) \leq \sum_{i \in I_b} \sum_{\substack{j' \in J_{i,r}^\oplus \\ j' \geq j}} D_{i,j'}^{(k)} \leq vb_{\max}^{(j)} L_k \quad (\text{VI.21})$$

$$\forall b \in B, r \in R_b, j \in J_r, k \in K_b$$

con q_{\max} denotando el volumen máximo transferido desde lotes en tránsito a terminales durante una operación.

A continuación, la Figura VI.4 ilustra un ejemplo que involucra un poliducto con una terminal de ingreso j_0 , una estación dual j_1 , y una terminal de destino j_2 . La parte superior de la Figura VI.4, describe el estado inicial del poliducto. Al tiempo $t = 0$, se encuentran dentro de la tubería los lotes $\{i1, i2, i4\}$. En la siguiente línea de la figura se observa el estado del poliducto luego que se ha efectuado el bloque b_1 consistente en una corrida de bombeo simple, es decir: $R_{b_1} = \{r_1\}$. La terminal de ingreso activa para r_1 es j_0 , y los conjuntos de terminales y segmentos activos son:

$$J_{r_1}^\oplus = \{j_1, j_2\}, J_{r_1} = \{j_1, j_2\}, \hat{J}_{i_2, r_1}^\oplus = \{j_1\}, \hat{J}_{i_1, r_1}^\oplus = \{j_2\}.$$

Suponiendo que el bloque $b1$ se ejecuta a través de una sola operación detallada $k1$ con una duración $L_{k1} = 2$ h, luego, el caudal en el segmento j_1 está dado por: $[D_{i_2,j_1}^{(k1)} + D_{i_1,j_2}^{(k1)}] / L_{k1} = (100 + 100) / 2 \text{ h} = 200 / 2 = 100$ unidades/h. En el segmento j_2 , la velocidad del flujo es de 50 unidades/hora debido a que $D_{i_1,j_2}^{(k1)} = 100$.

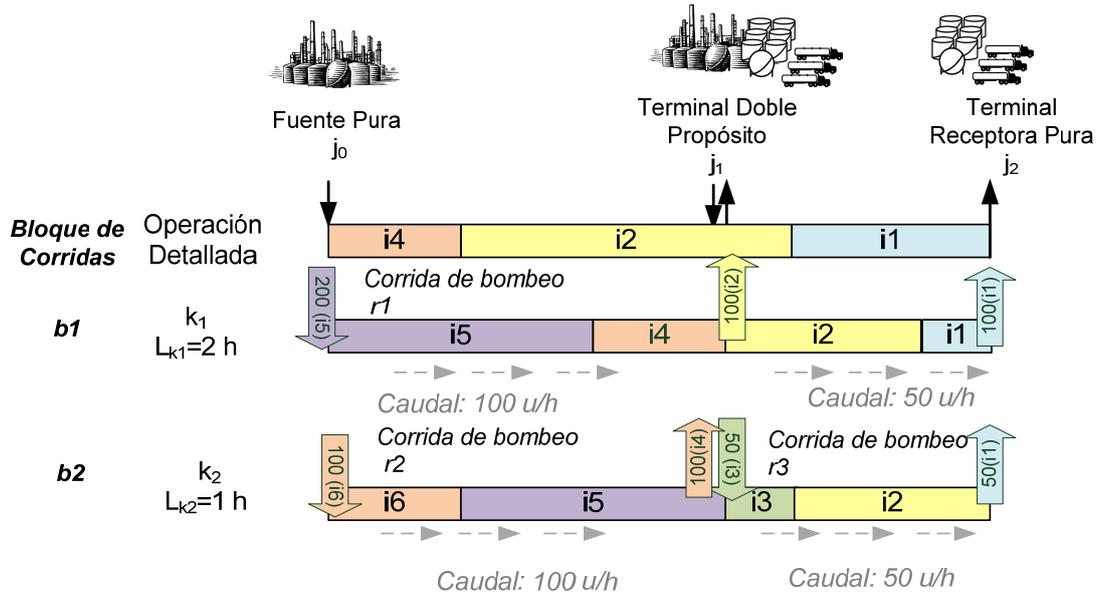


Figura VI.4. Cálculo del caudal en cada segmento del poliducto

En la parte inferior de la Figura VI.4 se describe el estado final del poliducto luego de ejecutar el bloque b_2 que incluye dos corridas individuales ($R_{b_2} = \{r_2, r_3\}$) que se llevan a cabo a través de una operación simple k_2 con una duración $L_{k_2} = 1$ h. Las estaciones de inyección j_0 y j_1 están activas durante las corridas agregadas r_2 y r_3 mientras se inyectan los lotes i_6 e i_3 , respectivamente. Adicionalmente, los conjuntos de terminales y segmentos activos para las corridas de bombeo individuales r_2 y r_3 son: $\mathcal{J}^{\oplus}_{r_2} = \{j_1\}$, $\mathcal{J}^{\oplus}_{r_3} = \{j_2\}$, $\mathcal{J}_{r_2} = \{j_1\}$, $\mathcal{J}_{r_3} = \{j_2\}$, $\mathcal{J}^{\oplus}_{i_4,r_2} = \{j_1\}$, y $\mathcal{J}^{\oplus}_{i_1,r_3} = \{j_2\}$. Para las secciones j_1 y j_2 , el caudal está dado por: $D_{i_4,j_1}^{(k_2)} / L_{k_2} = 100 / 1 = 100$ unidades/h, y $D_{i_1,j_2}^{(k_2)} / L_{k_2} = 50 / 1 = 50$ unidades/h, respectivamente. Note que el caudal permanece sin cambio respecto a la operación previa,

pero en este caso se llevan a cabo dos inyecciones en simultáneo, en lugar de una simple.

VI.4.3.5. Volumen activado/detenido durante cada operación detallada

Para determinar el costo del volumen reactivado y detenido en cada operación detallada, es importante identificar los segmentos del poliducto donde el caudal se detiene o se reactiva. Esto se puede lograr comparando el estado de cada segmento $j \in J$ de la tubería entre dos operaciones sucesivas. El volumen de un segmento j que conecta las terminales $(j-1)$ y j se puede computar a través de la diferencia entre las coordenadas volumétricas σ_j y σ_{j-1} , donde $\sigma_0 = 0$ representa la coordenada de la terminal de inyección ubicada en el origen de la tubería. Luego, el volumen total activado y detenido durante la operación k se definen por las restricciones (VI.22) y (VI.23), respectivamente. Si el segmento j está detenido en la operación $(k-1)$ y el caudal se activa en la siguiente operación k luego $\omega_j^{(k)} - \omega_j^{(k-1)} = 1$, y el volumen activado se calcula como $AV_j^{(k)} = \sigma_j - \sigma_{j-1}$, es decir, el volumen del segmento j .

$$SV_j^{(k)} \geq (\sigma_j - \sigma_{j-1})(\omega_j^{(k-1)} - \omega_j^{(k)}) \quad \forall j \in J', k \in K \quad (VI.22)$$

$$AV_j^{(k)} \geq (\sigma_j - \sigma_{j-1})(\omega_j^{(k)} - \omega_j^{(k-1)}) \quad \forall j \in J', k \in K \quad (VI.23)$$

Para la primera operación ($k = first(K)$), $\omega_j^{(k-1)}$ indica el estado del segmento j al comienzo del horizonte de planeación. Si $\omega_j^{(k-1)}$ es igual a uno, el segmento j está activo al tiempo $t = 0$ y vale cero si está inactivo

VI.4.4 Función objetivo

El objetivo del problema consiste en desarrollar una planificación detallada de las operaciones en el poliducto que cumpla con lo prescripto

en el plan agregado a mínimo costo de reactivación de flujos en segmentos de la tubería, y de encendido y apagado de bombas a través de la ejecución de un mínimo número de operaciones.

Los costos de reactivación y detención de segmentos se pueden estimar a través de la ecuación (VI.24) sumando el volumen reactivado y detenido para todas las operaciones detalladas, y multiplicando dicha suma por el correspondiente coeficiente de costo ca y cs , respectivamente. Por su parte, el último término de la restricción (VI.24) tiende a minimizar el número total de operaciones no ficticias, cada una requiriendo la puesta en marcha ó la detención de bombas de impulsión.

$$\text{Min } z = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J'} (cs SV_j^{(k)} + ca AV_j^{(k)}) + \sum_{k \in K} fco u_k \quad (\text{VI.24})$$

VI.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo de esta sección se aborda un par de ejemplos aplicando la formulación matemática propuesta para la programación detallada de poliductos con múltiples fuentes. Dichos ejemplos implican el transporte por poliducto de un máximo de seis productos diferentes, desde tres estaciones de entrada hacia múltiples terminales de distribución. En ambos casos, el modelo matemático MILP se resolvió usando un procesador Intel Core i7 (3.33 GHz) con GAMS / Gurobi 3.0 (Brooke y colab., 2006), con cuatro núcleos en paralelo. La tolerancia de optimización fue fijada en 10^{-9} . Además, se adoptaron los siguientes valores para los coeficientes de la función objetivo: $ca = 0.10$ [\$/ m³], $cs = 0.00$ [\$/ m³], y $fco = 1000$ [\$/ operación].

VI.5.1 Ejemplo VI.1: Un caso de estudio real – Red de poliductos argentinos

La formulación propuesta se aplica primeramente a un caso de estudio introducido por Cafaro y Cerdá (2010) que será referido como Ejemplo VI.1. Dicho ejemplo considera una parte importante de la red de poliductos con la que cuenta Argentina (Ver Figura VI.5). La misma está compuesta por una serie de cuatro nodos logísticos: la refinería de Luján de Cuyo, en la provincia de Mendoza (nodo de ingreso N1), la terminal de recepción en Villa Mercedes, San Luis (nodo de egreso N2), el nodo de doble propósito ubicado en Montecristo, provincia de Córdoba (N3) y la granja de tanques de la localidad de San Lorenzo en la provincia de Santa Fe (nodo N4).

Los nodos (N1 y N3) componen las terminales de ingreso del sistema bajo estudio, y está permitida la realización de inyecciones en simultáneo desde dichos nodos. El centro N3 es en realidad un nodo doble propósito que puede inyectar un nuevo lote al interior de la tubería y simultáneamente recibir una cierta cantidad de producto impulsado por la inyección de un nuevo lote desde la fuente N1, ubicada aguas arriba. El nodo N3, ubicado en Montecristo (Córdoba), constituye un punto clave en la cadena de suministro de combustibles del país ya que además de recibir material proveniente de la refinería de Luján de Cuyo (N1), también recoge una parte importante de la producción de la destilería de Campo Durán, en la provincia de Salta.

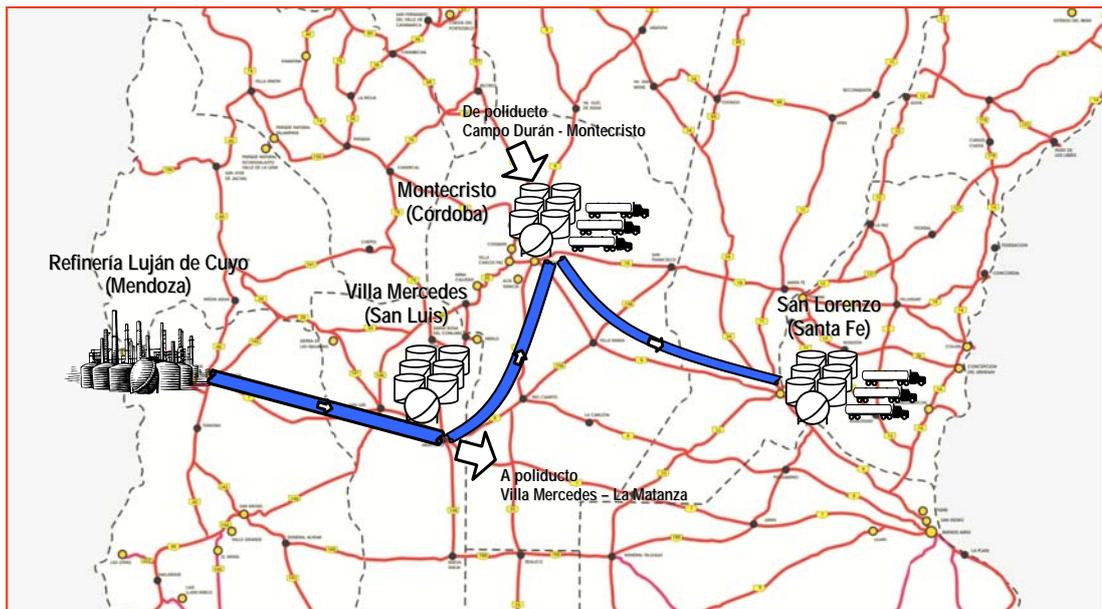


Figura VI.5. Red de Poliductos Argentinos considerada en el Ejemplo VI.1

La tasa de bombeo en las dos terminales de inyección debe oscilar entre 310 y 580 m³/h. Por su parte, los depósitos N2, N3 y N4 son nodos de destino de lotes de cinco productos refinados (P1, P2, P3, P4, P5) transportados por el poliducto. El nodo N2 demanda específicamente productos P1, P2, y P4, la estación dual N3 es el destino para lotes de productos P2 y P4; mientras que la terminal receptora N4 demanda los cinco productos transportados por el poliducto.

La longitud del horizonte de planeación, dentro del cual deben satisfacerse los requerimientos de los depósitos, es de 240 hs. Los productos demandados y las cantidades requeridas por las terminales durante los diez días del horizonte, así como los inventarios iniciales en los tanques de los nodos fuentes para el Ejemplo VI.1 pueden encontrarse en la publicación de Cafaro y Cerdá (2010).

En la Figura VI.5 se observa que el sistema se compone de tres segmentos de poliducto, cada uno conectando un par de nodos consecutivos. La extensión total del poliducto, desde el nodo ubicado en el origen (N1) hasta

la terminal N4 (al final de la tubería), es de aproximadamente 1000 km. Los volúmenes de los tres segmentos unidireccionales del poliducto que unen las terminales de Luján de Cuyo y Villa Mercedes (N1–N2), Villa Mercedes–Montecristo (N2–N3), Montecristo–San Lorenzo (N3–N4) son 336, 233 y 277 [10² m³], respectivamente. Para evitar contaminación entre lotes, las siguientes secuencias de productos están prohibidas: P2–P3, P3–P2, P3–P4 y P4–P3.

En la Figura VI.6 se muestra el plan agregado para el Ejemplo VI.1 reportado por Cafaro y Cerdá (2010).

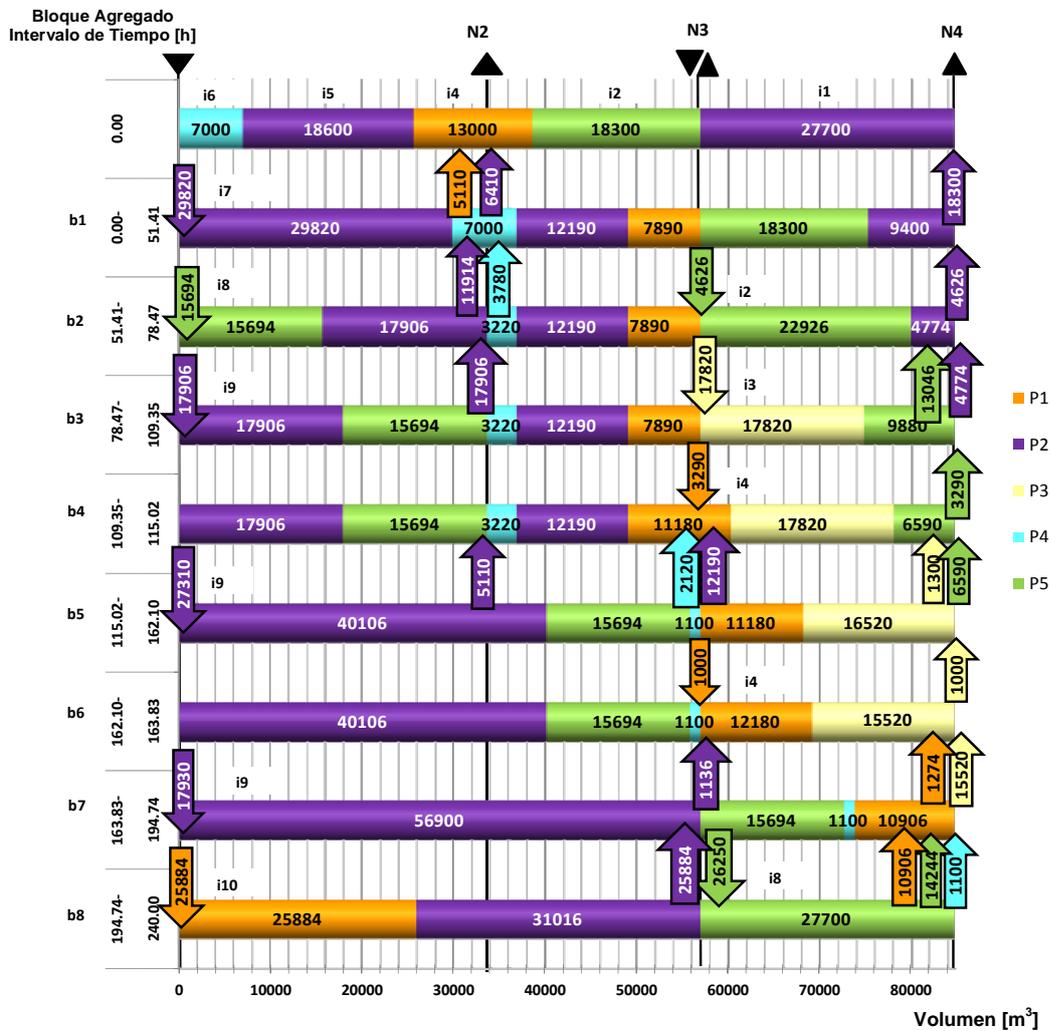


Figura VI.6. Planeación Agregada para el Ejemplo VI.1 reportado por Cafaro y Cerdá (2010)

La primera línea de la figura ilustra el contenido inicial del poliducto compuesto por una secuencia de cinco lotes: $i1^{P2}$ – $i2^{P5}$ – $i4^{P1}$ – $i5^{P2}$ – $i6^{P4}$, donde el supraíndice indica el producto contenido en cada lote. A nivel agregado, el objetivo del problema consiste en encontrar el plan operacional para los próximos diez días que satisfaga las demandas de todos los depósitos a un mínimo costo operativo total (bombeo, transición y pedidos pendientes). Los costos de pedidos pendientes pueden surgir debido a la existencia de demandas insatisfechas al final del horizonte de tiempo.

Tal como se describe en la Figura VI.6, el plan comprende la inyección de un total de 11 lotes (6 desde el nodo N1 y 5 desde el nodo N3) a través de 8 bloques de corridas de bombeo. Los bloques b2, b3 y b8 involucran un par de inyecciones en paralelo, y los otros cinco bloques incluyen sólo una operación de entrada. Un total de 10 lotes son transportados por el poliducto durante los diez días de planeación, debido a que ciertas corridas sólo aumentan los tamaños de lotes ya existentes. La solución al problema de planificación agregada incluye un total de 23 entregas a terminales. A la izquierda de la Figura VI.6, se reportan los tiempos de inicio y finalización de cada bloque. También se pueden obtener todos los datos requeridos para modelar el problema de programación detallada de poliductos con múltiples fuentes, en lo que refiere a la definición de conjuntos y parámetros. Con esa información se pueden definir los conjuntos de potenciales terminales y segmentos activos, las entregas agregadas de productos, las terminales de entrada activas, así como el lote inyectado, y su tamaño durante cada corrida agregada. Esta información se encuentra detallada en las Tablas VI.1 y VI.2. Para computar el volumen detenido y reactivado que se acumula durante el horizonte de planeación, se supone

que el poliducto está inicialmente inactivo, el máximo caudal permitido en cada segmento es de 580 m³/h y el caudal mínimo es de 100 m³/h para cada tramo.

Para elegir la cardinalidad de cada conjunto de operaciones por bloque de corridas K_b , se pueden aplicar al menos dos alternativas. Ellas son:

- (a) el número total de entregas agregadas a realizar mientras se ejecuta el bloque de inyecciones de lotes b dado por:

$$|K_b| = \sum_{r \in R_b} \sum_{i \in I_b} |\hat{J}_{i,r}^{\oplus}|$$

- (b) el número máximo de entregas de productos prescrito en la planeación agregada durante la inyección del bloque b ; es decir:

$$|K_b| = \max_{r \in R_b} \left\{ \sum_{i \in I_b} |\hat{J}_{i,r}^{\oplus}| \right\}$$

Utilizando el primer criterio, el valor de $|K_b|$ correspondiente a cada uno de los 8 bloques agregados es: [3, 3, 3, 1, 5, 1, 3, 4], y $|K| = 23$.

De acuerdo al criterio (b), $|K_b|$ genera la siguiente lista [3, 2, 2, 1, 5, 1, 3, 3], y por lo tanto $|K| = 20$.

Para resolver la formulación matemática del Ejemplo VI.1 se seleccionó el criterio (b) porque generalmente propone un número suficiente de operaciones por bloque de corridas y conduce a modelos matemáticos de menor tamaño. Cabe aclarar que al aplicar el criterio (a) no se observan cambios respecto a la solución óptima obtenida, aunque el costo computacional aumenta.

Tabla VI.1. Tamaño de las inyecciones, terminales de recepción y segmentos activos durante cada corrida agregada para el Ejemplo VI.1

Bloque	Corridas de Bombeo	Lote Inyectado	Tamaño del Lote Inyectado (qq_i) en m ³	Terminales Activas (J_r^{\oplus})	Segmentos Activos Candidatos (J_i)
b1	r1	i7	29820	N2, N4	N1-N2, N2-N3, N3-N4
b2	r2	i8	15694	N2	N1-N2
	r3	i2	4626	N4	N3-N4
b3	r4	i9	17906	N2	N1-N2
	r5	i3	17820	N4	N3-N4
b4	r6	i4	3290	N4	N3-N4
b5	r7	i9	27310	N2, N3, N4	N1-N2, N2-N3, N3-N4
b6	r8	i4	1000	N4	N3-N4
b7	r9	i9	17930	N3, N4	N1-N2, N2-N3, N3-N4
b8	r10	i10	25884	N3	N1-N2, N2-N3
	r11	i8	26250	N4	N3-N4

Tabla VI.2. Terminal de inyección y entregas agregadas durante cada corrida de bombeo del Ejemplo VI.1

Bloque	Tiempo de Inicio (h)	Tiempo de Finalización (h)	Corridas de Bombeo	Terminal de Inyección	Entregas Agregadas de Productos		
					Lote	Terminal	Tamaño
b1	0.00	51.41	r1	N1	i4	N2	5110
					i5	N2	6410
					i1	N4	18300
b2	51.41	78.47	r2	N1	i6	N2	3780
			r3	N3	i7	N2	11914
					i1	N4	4626
b3	78.47	109.34	r4	N1	i7	N2	17906
			r5	N3	i2	N4	13046
					i1	N4	4774
b4	109.34	115.02	r6	N3	i2	N4	3290
b5	115.02	162.10	r7	N1	i9	N2	5110
					i5	N3	12190
					i6	N3	2120
					i2	N4	6590
					i3	N4	1300
b6	162.10	163.83	r8	N3	i3	N4	1000
b7	163.83	194.74	r9	N1	i9	N3	1136
					i3	N4	15520
					i4	N4	1274
b8	194.74	240.00	r10	N1	i9	N3	25884
			r11	N3	i4	N4	10906
					i6	N4	1100
					i8	N4	14244

La mejor programación detallada de operaciones de corte para el ejemplo se muestra en la Figura VI.7. El modelo se resolvió en 0.107 segundos de tiempo de CPU. En la Tabla VI.3 se reportan los resultados computacionales, incluyendo el tamaño del modelo, el número de operaciones de corte, y el mejor valor objetivo encontrado. El "schedule" óptimo incluye una secuencia de 19 operaciones detalladas a realizar para satisfacer el plan agregado.

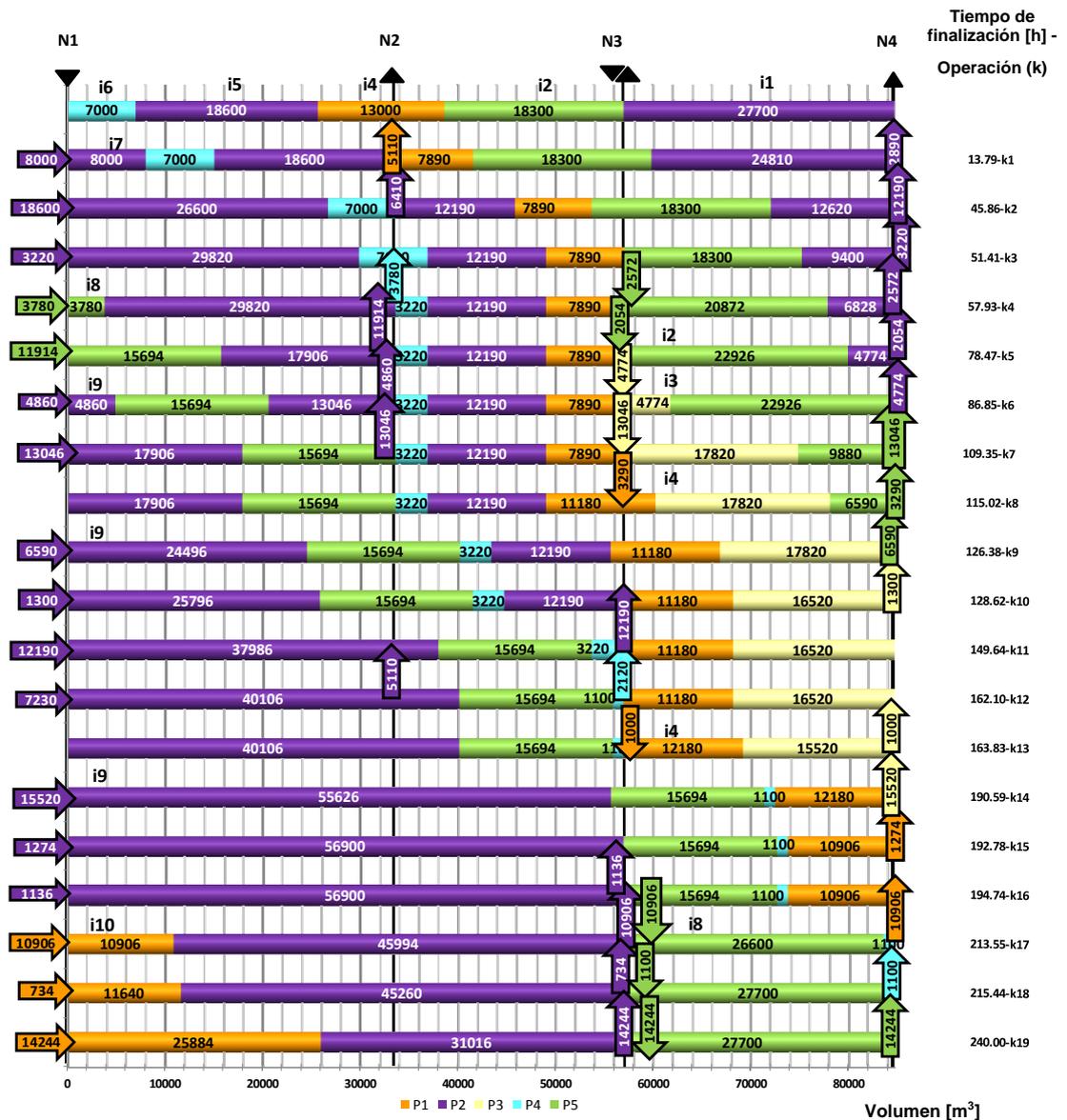


Figura VI.7. Mejor solución del problema de "scheduling" detallado para el Ejemplo VI.1

Tabla VI.3. *Tamaños de los modelos, requerimientos computacionales y resultados para los Ejemplos VI.1 y VI.2*

Ej	Bloque Agregado $ B $	Corrida de Bombeo $ R $	Operación Detallada $ K $	Volumen Activado [10 ² m ³]	Volumen Detenido [10 ² m ³]	Tiempo de CPU [s]	Vbles Continuas	Vbles Binarias	Ecuaciones
1	8	11	19	2538	1692	0.107	1199	116	2190
2	10	14	22	4200	2800	0.205	2914	157	4863

Para llevar a cabo el primer bloque de corridas agregadas b_1 dentro del intervalo (0.00 h – 51.41 h), es necesario ejecutar una serie de tres operaciones detalladas (k_1, k_2, k_3):

(k_1) Desde la hora 0.00 h hasta las 13.79 h, la operación k_1 se ejecuta para comenzar la inyección del lote i_7^{P2} dentro de la línea desde la estación N1. En total se inyectan 8000 m³ y en simultáneo se entregan 5110 m³ de producto P1 a la terminal N2 y 2890 m³ de producto P2 al último nodo (N4) desde los lotes i_4 e i_7 , respectivamente. Por lo tanto, el fluido está en movimiento a lo largo de toda la tubería; es decir, no hay ningún segmento detenido.

(k_2) La segunda operación continua inyectando el lote i_7^{P2} desde el nodo fuente N1 desde el tiempo $t = 13.79$ h hasta $t = 45.86$ h, mientras se abastece al depósito N2 con 6410 m³ de producto P2 desde el lote i_5 y simultáneamente se derivan hacia la terminal N4, 12190 m³ de P2 provenientes del lote i_7 . Como resultado todos los segmentos permanecen activos.

(k_3) Finalmente la última operación detallada que permite cumplimentar bloque b_1 , se ejecuta entre la hora $t = 45.86$ h y $t = 51.41$ h para atender la demanda remanente de producto P2 (3220 m³) en el nodo N4 desde el

lote $i7$, mientras se completa la inyección del lote $i7^{P2}$ desde el nodo fuente N1.

Un detalle del seguimiento del caudal en cada segmento del poliducto se muestra en la Tabla VI.4 y en la Figura VI.8. Durante las operaciones k_1 , k_2 y k_3 el segmento N1–N2 opera al caudal máximo permitido: 580 m³/h. En contraste, las secciones N2–N3 y N3–N4 presentan caudales más bajos (210 y 380 m³/h) cuando se llevan a cabo las operaciones k_1 y k_2 debido a que se realizan entregas parciales en el nodo N2 a una tasa de descarga de 370 m³/h en la operación k_1 y 200 m³/h durante la operación k_2 . Durante la operación k_3 , ambos segmentos trabajan al máximo caudal permitido de 580 m³/h (ver Tabla VI.4).

El próximo bloque agregado $b2$ que comprende dos inyecciones de productos en sendas terminales de ingreso, se implementa a través de dos operaciones detalladas de inyección (k_4 , k_5).

(k_4) La operación k_4 comienza a inyectar el lote $i8^{P5}$ desde el nodo origen N1, generando una entrega de 3780 m³ de producto P4 a la terminal N2 desde el lote $i6$. Al mismo tiempo, se inyecta un lote de producto P5 en el nodo N3 provocando la derivación de 2572 m³ de producto P2 a la terminal N4 procedente del lote $i7$. Como resultado, se detiene el flujo en el segmento intermedio N2–N3.

(k_5) En la operación siguiente k_5 , continúan ambas inyecciones pero a un caudal diferente. Se efectúa una inyección adicional desde el lote $i8^{P5}$ en el nodo N1 mientras se entregan 11914 m³ de producto P2 proveniente del lote $i7$ en la terminal N2 al máximo caudal permitido. Por otra parte, una cantidad adicional del lote $i2^{P5}$ se inserta en la estación dual N3 para

despachar un volumen similar del lote $i1^{P2}$ al depósito N4 al mínimo caudal permitido ($100 \text{ m}^3/\text{h}$).

La Tabla VI.4 reporta las operaciones de corte necesarias para efectuar cada bloque de corridas agregadas junto al caudal adoptado en cada segmento del poliducto durante cada operación detallada. Suponiendo que el poliducto está inicialmente detenido, ocurren: (i) tres reactivaciones de flujo en los segmentos N1–N2 y N2–N3 durante las operaciones k_1 , k_9 , k_{14} y (ii) tres reactivaciones en el segmento N3–N4 en k_1 , k_{13} , y k_{17} . Durante el horizonte que abarca 10 días de programación, se registran nueve activaciones en total y seis detenciones. En la Figura VI.8 se indican las activaciones, con flechas verdes orientadas hacia arriba, las activaciones y con flechas rojas hacia abajo las detenciones. Tres de las nueve reactivaciones que ocurren en los segmentos N1–N2 y N2–N3 están predeterminadas por el plan agregado. Adicionalmente, tres activaciones ocurren debido a que el poliducto está inicialmente detenido.

En consecuencia, el mejor schedule detallado de operaciones para el Ejemplo VI.1 incluye seis detenciones, cuatro de ellas están pre-establecidas por el plan agregado. Dos de ellas ocurren simultáneamente en los segmentos N1–N2 y N2–N3 durante la operación detallada k_{13} mientras se ejecuta el bloque $b6$. Las otras detenciones tienen lugar en el segmento N1–N2 durante la operación k_8 , en el segmento N2–N3 al ejecutarse k_4 y la sección N3–N4 durante las operaciones k_{11} y k_{16} . De acuerdo al plan agregado, sólo estará activo el último segmento (N3–N4) durante las operaciones k_8 y k_{13} . Observando el perfil de caudales en cada segmento del poliducto que se muestra en la Figura VI.8, está claro que la solución óptima tiende a mantener, en lo posible, una corriente de flujo finito en cada segmento, para evitar reactivaciones innecesarias.

Tabla VI.4. Variación del caudal en cada segmento del poliducto para el Ejemplo VI.1

Bloque	Operación detallada k	Caudal [m ³ /h]			Nodo de Inyección Activo	Nodo de Recepción Activo
		Segmento N1-N2	Segmento N2-N3	Segmento N3-N4		
b1	k1	580	210	210	N1	N2,N4
	k2	580	380	380	N1	N2, N4
	k3	580	580	580	N1	N4
b2	k4	580	0	395	N1,N3	N2,N4
	k5	580	0	100	N1,N3	N2,N4
b3	k6	580	0	570	N1,N3	N2,N4
	k7	580	0	580	N1,N3	N2,N4
b4	k8	0	0	580	N3	N4
	k9	580	580	580	N1	N4
b5	k10	580	580	580	N1	N4
	k11	580	580	0	N1	N3
	k12	580	170	0	N1	N2, N3
b6	k13	0	0	580	N3	N4
	k14	580	580	580	N1	N4
b7	k15	580	580	580	N1	N4
	k16	580	580	0	N1	N3
	k17	580	580	580	N1, N3	N3, N4
b8	k18	387	387	580	N1, N3	N3, N4
	k19	580	580	580	N1, N3	N3, N4

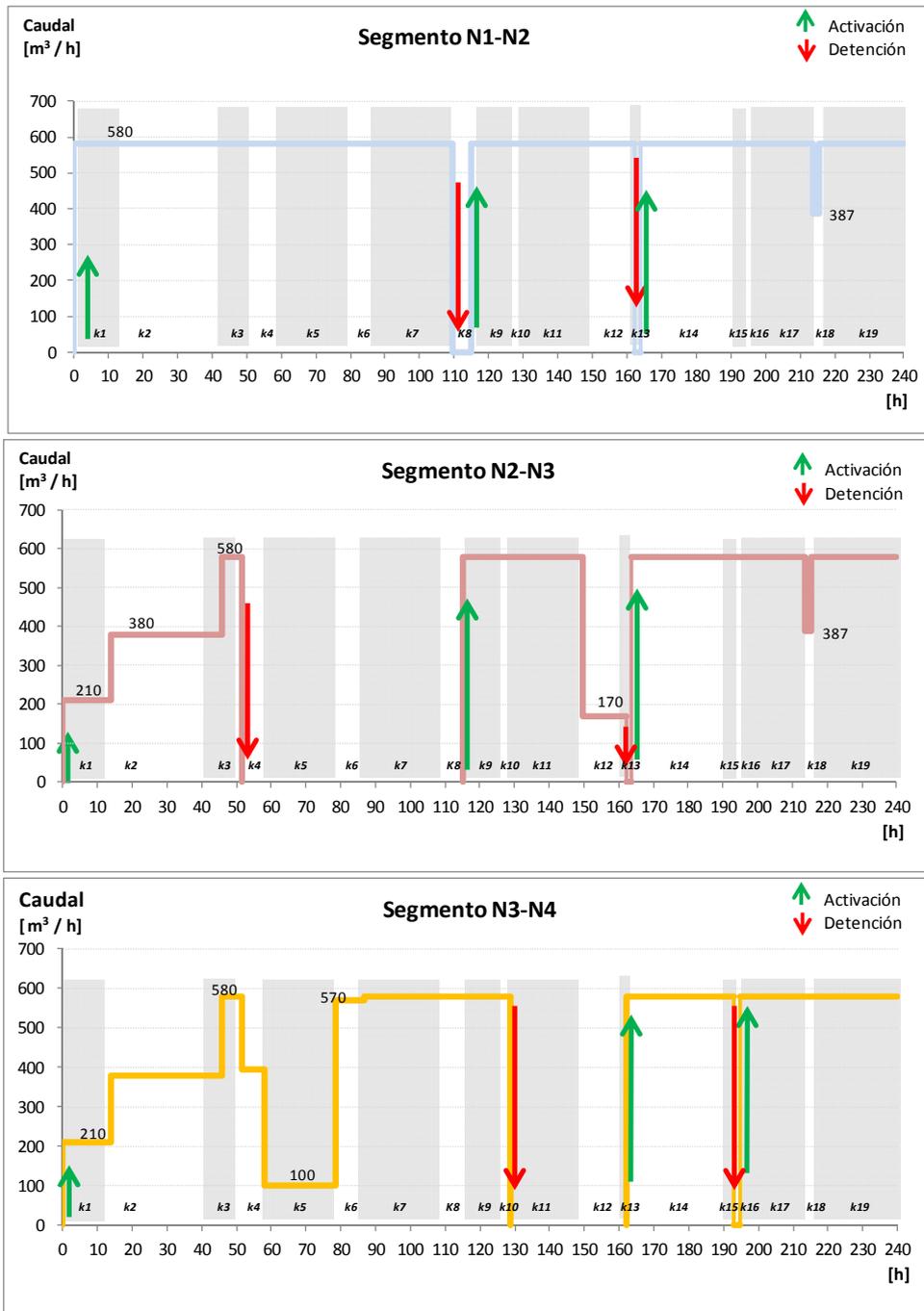


Figura VI.8. Seguimiento del caudal en cada segmento del poliducto durante el horizonte de planeación (Ejemplo VI.1)

Una situación particular se observa en el segmento N3–N4 durante las operaciones detalladas k_4 y k_5 . De acuerdo al plan agregado, el segmento N2–N3 está inactivo durante todo el bloque b2 involucrando inyecciones simultáneas desde los nodos N1 y N3. Durante ese bloque de corridas

paralelas, la primera sección del poliducto (N1–N2) opera al máximo caudal permitido (580 m³/h), mientras que el último segmento (N3–N4) trabaja con caudales más bajos (395 y 100 m³/h). Esto ocurre porque el volumen total inyectado en N3 es inferior al tamaño del lote concurrentemente inyectado en el nodo N1.

VI.5.2 Ejemplo VI.2

El Ejemplo VI.2 considera una red de poliductos más compleja que se describe en la Figura VI.9. El sistema está compuesto por cinco segmentos unidireccionales transportando seis productos (P1, P2, P3, P4, P5, P6) desde tres fuentes (N1, N2, N3) hacia cuatro terminales de destino (N3, N4, N5, N6). La terminal N3 es una estación doble propósito, es decir puede recibir e inyectar producto. El poliducto tiene una extensión de 900 km y un diámetro de 20", con un volumen total de 1800 [10² m³]. El volumen correspondiente a cada uno de los cinco segmentos (N1–N2, N2–N3, N3–N4, N4–N5, N5–N6) es de 200, 600, 600, 200 y 200 [10² m³], respectivamente. Por otra parte, en la Tabla VI.5 se muestran los inventarios disponibles en los tanques de cada terminal de ingreso, mientras que en la Tabla VI.6 se listan las demandas de productos de cada destino. Los volúmenes demandados se deben satisfacer en su totalidad a lo largo del horizonte de planeación. El estado inicial del sistema comprende la siguiente secuencia de lotes: P4²⁰⁰ – P6²⁰⁰ – P3⁴⁰⁰ – P2²⁰⁰ – P1²⁰⁰ – P4⁴⁰⁰ – P1²⁰⁰, donde los supra índices indican el tamaño en 10²m³. Para evitar contaminación de producto, las secuencias P3–P4 y P4–P3 están prohibidas.

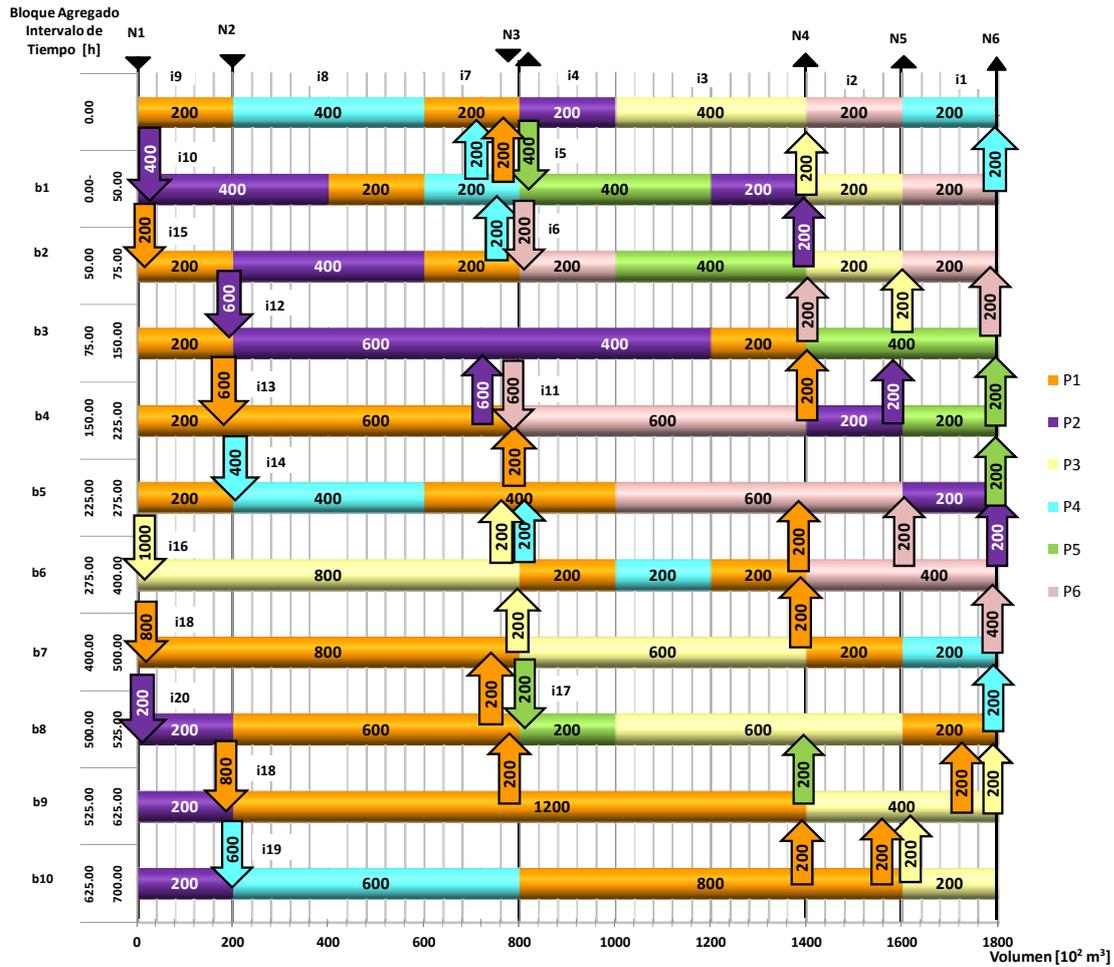


Figura VI.9. Planeación agregada para el Ejemplo VI.2

Tabla VI.5. Inventarios iniciales disponibles en las terminales de entrada en el Ejemplo VI.2 (en $10^2 m^3$)

Terminal de Inyección	P1	P2	P3	P4	P5	P6
N1	1000	600	1000			
N2	1400	600		1000		
N3					600	800

Tabla VI.6. Demanda de Productos de las terminales receptoras para el Ejemplo VI.2 (en 10^2 m^3)

Terminales Receptoras	P1	P2	P3	P4	P5	P6
N3	800	600	400	600		
N4	800	200	200		200	200
N5	200	200	400			200
N6	200	200	200	400	400	600

Se supone que el plan agregado de operaciones cuyo horizonte de planeación es de 700 h (29 días) se encuentra disponible. Dicho plan se muestra en la Figura VI.9, e incluye diez bloques de corridas agregadas, a través de los cuales se inyectan catorce lotes. El objetivo es obtener la secuencia óptima de operaciones detalladas de corte que de cumplimiento al plan agregado.

El plan agregado supone un caudal máximo de $800 \text{ m}^3/\text{h}$ en todos los segmentos del poliducto. En el nivel detallado se mantiene ese valor máximo de caudal pero también se establece un caudal mínimo de $400 \text{ m}^3/\text{h}$. Es decir, en el nivel detallado de operaciones el fluido contenido en el poliducto puede ser transportado a velocidades entre 400 y $800 \text{ m}^3/\text{h}$. La cardinalidad de cada conjunto K_b se adopta teniendo en cuenta el número total de entregas previstas por el plan agregado durante la inyección de cada bloque b . Como resultado, el valor de $|K_b|$ correspondiente a cada uno de los diez bloques del plan agregado es el siguiente: [2, 1, 3, 3, 2, 5, 3, 1, 4, 3] y $|K| = 27$. Se supone que el poliducto está inicialmente detenido.

El programa detallado de operaciones de corte para el Ejemplo VI.2, obtenido mediante la resolución del modelo MILP descrito en el presente capítulo, se muestra en la Figura VI.10.

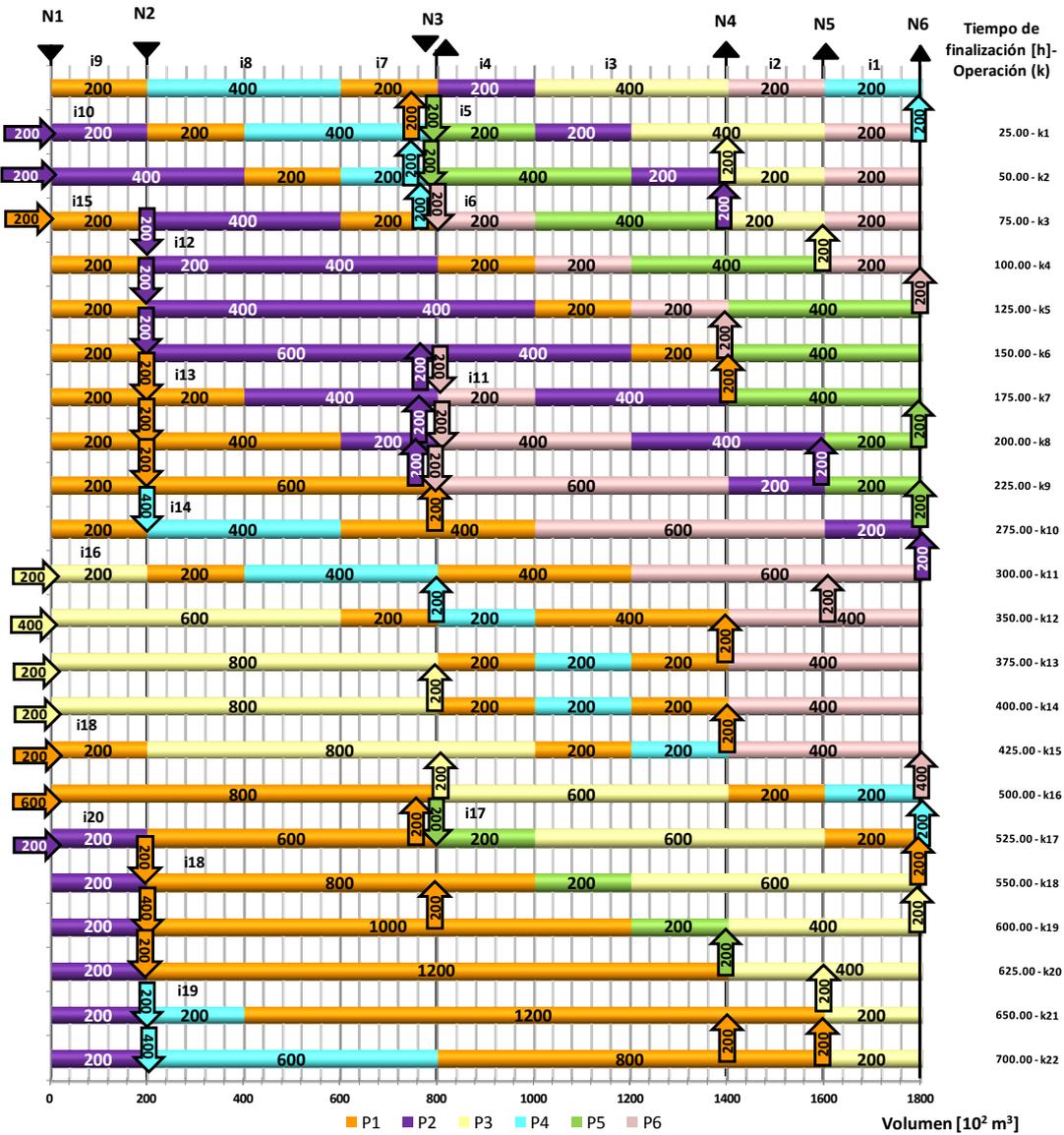


Figura VI.10. Programación detallada de entregas para el Ejemplo VI.2
 (rango de caudal permitido: 400 – 800 m³/h)

El tiempo de resolución es de 0.205 segundos de tiempo de CPU y comprende 22 operaciones en total, siete de las cuales ($k_1, k_2, k_3, k_7, k_8, k_9, k_{17}$) involucran inyecciones desde dos fuentes en simultáneo. Más aún, se observan cinco operaciones ($k_{10}, k_{12}, k_{16}, k_{19}, k_{22}$) que derivan productos a múltiples terminales al mismo tiempo mediante la inyección de un lote desde una única fuente. En esos caso, el caudal de la corriente decrece a lo largo del poliducto. En la Tabla VI.3 se muestra un resumen del tamaño del modelo y el requerimiento computacional para el Ejemplo VI.2.

A través de la Figura VI.11 y la Tabla VI.7 se puede analizar el perfil temporal del caudal en cada segmento del poliducto. Es evidente que el modelo intenta operar al máximo caudal permitido ($800 \text{ m}^3/\text{h}$) la mayor cantidad de tiempo posible. Al realizarse entregas simultáneas durante una misma operación, los segmentos más alejados del origen (N3–N4, N4–N5, N5–N6) trabajan a caudales inferiores (entre 400 y $530 \text{ m}^3/\text{h}$). En la solución óptima, se observan dos reactivaciones del flujo en el segmento N1–N2, una en N2–N3, dos en N3–N4, cinco en N4–N5 y cinco en N5–N6; es decir, un volumen total reactivado de $4200 [10^2\text{m}^3]$. Dichas reactivaciones se representan con flechas verdes orientadas hacia arriba en la Figura VI.11. Más aún, el segmento N1–N2 se detiene dos veces para permitir las inyecciones desde el nodo N2 pero la sección N2–N3 nunca se detiene. Dicho de otra manera, cada inyección desde el nodo doble propósito N3 es acompañada de una operación de bombeo en el nodo N1 o N2. De este modo, se puede concluir que el segmento N2–N3 es el "cuello de botella" del sistema de poliducto. Aguas abajo del nodo intermedio N3, el número de detenciones aumenta. El segmento N3–N4 se detiene una vez y los segmentos N4–N5 y N5–N6 son detenidos cuatro y cinco veces, respectivamente. Esto se puede ver a través de las flechas rojas orientadas hacia abajo en la Figura VI.11. Consecuentemente, el volumen total detenido es de $2800 [10^2\text{m}^3]$.

Una de las características más notables del enfoque propuesto tiene que ver con la reducida exigencia computacional incluso para casos de estudios que involucran varios productos refinados, un importante número de terminales de entrada / salida, y un horizonte de planificación mensual. Esto hace que el modelo pueda ser considerado para resolver problemas de programación de poliductos de la vida real.

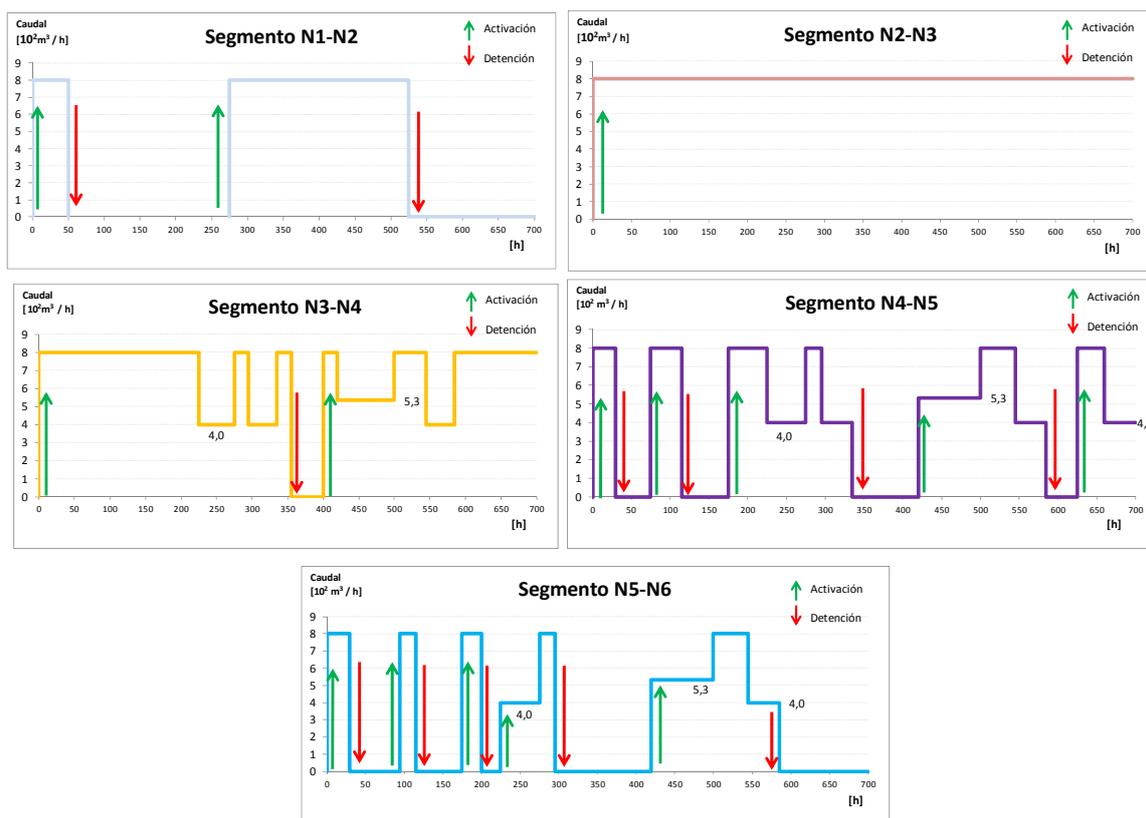


Figura VI.11. Seguimiento del caudal en cada segmento del poliducto durante el horizonte de planeación (Ejemplo VI.2)

Tabla VI.7. Variación del caudal en cada segmento del poliducto para el Ejemplo VI.2

Blo- que	Operación Detallada k	Caudal [$10^2\text{m}^3/\text{h}$]					Nodo de Inyección Activo	Nodo de Recepción Activo
		Segmento N1-N2	Segmento N2-N3	Segmento N3-N4	Segmento N4-N5	Segmento N5-N6		
b1	k1	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	N1,N3	N3,N6
	k2	8.0	8.0	8.0	0	0	N1,N3	N3,N4
b2	k3	0	8.0	8.0	0	0	N1,N3	N3,N4
	k4	0	8.0	8.0	8.0	0	N2	N5
b3	k5	0	8.0	8.0	8.0	8.0	N2	N6
	k6	0	8.0	8.0	0	0	N2	N4
	k7	0	8.0	8.0	0	0	N2,N3	N3,N4
b4	k8	0	8.0	8.0	8.0	8.0	N2,N3	N3,N6
	k9	0	8.0	8.0	8.0	0	N2,N3	N3,N5
b5	k10	0	8.0	4.0	4.0	4.0	N2	N3,N6
	k11	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	N1	N6
b6	k12	8.0	8.0	4.0	4.0	0	N1	N3,N5
	k13	8.0	8.0	8.0	0	0	N1	N4
	k14	8.0	8.0	0	0	0	N1	N3
b7	k15	8.0	8.0	8.0	0	0	N1	N4
	k16	8.0	8.0	5.3	5.3	5.3	N1	N3,N6
b8	k17	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	N1,N3	N3,N6
	k18	0	8.0	8.0	8.0	8.0	N2	N6
b9	k19	0	8.0	4.0	4.0	4.0	N2	N3,N6
	k20	0	8.0	8.0	0	0	N2	N4
	k21	0	8.0	8.0	8.0	0	N2	N5
b10	k22	0	8.0	8.0	4.0	0	N2	N4,N5

VI.6. CONCLUSIONES PRELIMINARES

A lo largo del presente capítulo se logra desarrollar una formulación matemática continua de tipo MILP, altamente eficiente para el problema de programación detallada de las operaciones de inyección y entrega en sistemas de poliductos con múltiples fuentes y terminales de destino. Es importante destacar que uno de los ejemplos resueltos involucra la programación de las operaciones de un caso de estudio real que comprende una parte de la red de poliductos con los que cuenta la Argentina. Desagregando el plan de transporte de combustibles hallado en el nivel agregado a través del enfoque de tiempo continuo desarrollado por Cafaro y Cerdá (2010) se logra obtener la programación detallada de operaciones de corte que será efectivamente ejecutada por el operador del poliducto. Cada operación de bombeo puede involucrar la ejecución de dos o más inyecciones simultáneas de lotes que no interactúen entre sí. Los flujos causados por dichas operaciones nunca colisionan debido a que están limitados a segmentos que no se solapan.

Contribuciones previas disponibles en la bibliografía suponen que las operaciones de bombeo están asociadas a una única fuente de inyección, y que el flujo se detiene en los segmentos que conectan el depósito que está siendo atendido y la próxima terminal de inyección. En cambio, el modelo propuesto permite inyecciones en paralelo en más de una fuente, y una misma operación de inyección puede provocar entregas múltiples, evitando detenciones innecesarias que subsecuentemente generan reactivaciones de diversos segmentos y un mayor costo de bombeo. Esto se logra manteniendo el fluido en movimiento la mayor cantidad de tiempo posible en cada segmento, a través de entregas parciales "al paso" a terminales intermedias, lo que permite al resto de los lotes continuar desplazándose a

menor velocidad hacia destinos más lejanos. Esta característica del modelo genera dos ventajas principales. Por un lado, permite ajustar apropiadamente el caudal en cada segmento del poliducto a través de entregas parciales a terminales intermedias. Por el otro, se obtiene un importante ahorro en el consumo de energía respecto a los métodos que sólo admiten operaciones de corte simples, al lograr mantener un flujo finito en más secciones de la tubería por un período de tiempo más largo.

Por su parte, la determinación del parámetro relacionado con el número de operaciones detalladas $|K_b|$ para cada bloque b de corridas de bombeo es un aspecto crítico del modelo. La mejor estimación para $|K_b|$ está dada por el mayor número de entregas agregadas producidas durante alguno de los bloques de corridas prescritos en el plan agregado. En comparación con los enfoques discretos, tanto el número total de operaciones de inyección a lo largo del horizonte de planeación como el tamaño del modelo, decrecen por las inyecciones en paralelo y las entregas en simultáneo. Este hecho tiene un gran impacto en cuanto al tiempo de resolución requerido. El enfoque de programación detallada de poliductos propuesto fue utilizado para resolver un par de ejemplos. Los mismos involucraron el transporte de seis productos diferentes desde hasta tres estaciones de inyección y hacia múltiples terminales de destino. En ambos ejemplos, el "schedule" detallado óptimo se obtiene en tiempos de CPU muy bajos. Más aún, es muy probable que el mayor esfuerzo computacional esté relacionado con la etapa de planificación agregada. De acuerdo a los mencionados hallazgos, es de esperar que la propuesta metodológica desarrollada pueda ser eficientemente aplicada a casos reales de poliductos con múltiples fuentes.

Capítulo VII

CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJOS FUTUROS

VII.1. CONCLUSIONES FINALES

La importancia del transporte en la industria petrolera es incuestionable. En el mundo del petróleo, los oleoductos y los buques tanqueros son los medios por excelencia para el abastecimiento de crudos desde los yacimientos hasta las refinerías donde finalmente se procesan para obtener los productos derivados. Por su parte, los poliductos son medios clave para la distribución de productos refinados, acercándolos masivamente hacia los centros de consumo. Dado que los combustibles fósiles son fundamentales en la economía mundial de nuestros días (aproximadamente el 60% de la energía que se consume en el planeta se obtiene de ellos) el proceso de distribución cuenta con el desarrollo de una extensa red logística que permite llevar los combustibles desde las refinerías a los centros de consumo. En el caso de los combustibles de amplia utilización como las naftas, el gasoil y el combustible para aviación, el traslado desde las refinerías hacia las terminales de despacho se realiza en baches a través de

poliductos. Un poliducto típico puede transportar más de una decena de productos diferentes en forma sucesiva a través de una misma tubería, para ser entregados en las terminales de recepción ubicadas a lo largo del poliducto. Para esta operación es indispensable programar los envíos, las presiones y las velocidades de desplazamiento, a través de herramientas de soporte eficientes. Esta tarea se realiza en los centros de operación de las compañías petroleras y reviste una complejidad elevada dado el gran número de restricciones que deben ser consideradas.

El proceso de planificación del transporte de combustibles a través de poliductos busca definir por un lado, la cantidad de producto a enviar desde refinerías y puertos a los centros de distribución, y por el otro, la secuencia de corridas de bombeo a realizar. En la práctica el proceso responde a dos niveles jerárquicos de toma de decisión. En el nivel superior se obtiene el plan de inyección de lotes y entregas a terminales de distribución en términos agregados. En la etapa siguiente, dicho plan se refina para generar el programa detallado de operaciones a ser ejecutado por el operador del poliducto, tendientes a optimizar el funcionamiento del conjunto de válvulas de bloqueo y de acceso a tanques de terminales, y de bombas impulsoras de la red de poliductos. Las herramientas conocidas hasta el momento definen la secuencia óptima de inyección de lotes, pero no especifican con precisión el orden de ejecución de las derivaciones durante cada inserción de un nuevo lote. Por lo general, estas 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.

En respuesta a esta necesidad de proponer un plan de operaciones con un mayor nivel de detalle, el presente trabajo de tesis ha buscado desarrollar

herramientas de soporte a la toma de decisiones que ayuden al operador de poliducto a gestionar eficazmente los envíos de producto hacia las terminales de recepción. El principal objetivo ha sido proponer una metodología basada en un enfoque continuo MILP que permita obtener un programa detallado de operaciones que cumpla el plan agregado de transporte para diferentes configuraciones y políticas de abastecimiento, a mínimo costo total. Para estimar el costo operativo se considera que tanto el consumo de energía como los costos de mantenimiento de bombas, válvulas y otros dispositivos están mayormente determinados por el volumen total de los segmentos del poliducto que se ponen en movimiento al iniciar cada operación. En tal sentido, se incorporan los conceptos de segmento activo y segmento detenido, cuya inclusión permite calcular el costo de reactivación de segmentos del poliducto al efectuar los despachos prescritos en el plan agregado.

Con niveles de complejidad creciente, se han presentado diferentes alternativas a través de las cuales se logra resolver satisfactoriamente el problema de programación detallada de operaciones de cortes. En términos generales, los resultados obtenidos permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- ❖ A partir de los resultados de esta tesis se logra dar tratamiento a una tarea hasta el momento pendiente cuando se usan enfoques continuos: el desarrollo de técnicas computacionales para la obtención del programa detallado de operaciones de corte que lleva a cabo el operador del poliducto.
- ❖ Las técnicas de resolución propuestas establecen con precisión el cronograma de entregas en cada terminal de recepción así como el

programa de detenciones y reactivaciones de cada segmento de la tubería.

- ❖ El programa detallado de entregas que se obtiene a través de los métodos propuestos determina para cada derivación el tiempo de inicio y finalización, la terminal receptora, el producto a despachar y la cantidad.
- ❖ Las herramientas desarrolladas se aplican a diferentes configuraciones de poliductos y distintas políticas de abastecimiento: (1) Poliductos con una única fuente de inyección y múltiples terminales de entrega abastecidas de a una por vez; (2) Poliductos con una única fuente de inyección y múltiples destinos que pueden abastecerse en forma simultánea durante una misma operación; y (3) Poliductos con múltiples fuentes de inyección y múltiples destinos, con entregas simultáneas a múltiples terminales en cada operación.

La configuración más simple abordada en esta tesis consistió en un poliducto con una única fuente de inyección ubicada en el origen y múltiples terminales de destino, atendidas de a una por vez. Para obtener el programa detallado de operaciones de entregas en este tipo de configuraciones se propusieron dos métodos alternativos: (1) un modelo de simulación de eventos discretos y (2) un método riguroso de resolución a través de una formulación matemática MILP.

Las conclusiones salientes del desarrollo del modelo de simulación de poliductos se resumen a continuación:

- ❖ Constituye una herramienta de representación de gran utilidad para interpretar y analizar la operación de poliductos, incluyendo los sistemas de válvulas y unidades de impulsión de la red, facilitando la

visualización dinámica de la compleja operatoria de estos medios de transporte.

- ❖ Permite validar los programas de operaciones generados por técnicas de optimización rigurosas.
- ❖ Permite generar diferentes programas de entregas dependiendo del orden de prioridad de atención que se asigne a las terminales.
- ❖ Usa una lista de prioridades para establecer el orden en que se realizan las entregas definidas a través de reglas heurísticas alternativas encapsuladas en el modelo.
- ❖ Los resultados demuestran que las diferentes políticas de priorización de terminales receptoras generan distintos programas de entregas, con significativas diferencias en la eficiencia económica de la operación del sistema de transporte.
- ❖ La regla de priorización más eficiente entre las propuestas, que da prioridad a la terminal más cercana a la última abastecida, genera soluciones óptimas o cercanas al óptimo, que son obtenidas a muy bajos tiempos computacionales (máximo 6 segundos de tiempo de CPU). De los casos resueltos, sólo uno de ellos reporta un costo total 1.57 % por encima del valor óptimo.

En cuanto al modelo matemático propuesto, para la programación detallada de operaciones, sienta sus bases en el seguimiento continuo de los lotes dentro de la tubería, en escala de tiempo también continua. La formulación matemática tiene como objetivo hallar el programa detallado de entregas que presente el mínimo costo de activación de flujo, y a su vez la menor cantidad de operaciones de entregas a lo largo del horizonte de planificación. Los resultados más importantes fueron:

- ❖ El logro de importantes ahorros, en cuanto al consumo de energía y costos de mantenimiento de bombas y dispositivos de impulsión, de hasta un 55.7 %.
- ❖ El desarrollo de diferentes estrategias de descomposición a través de las cuales se pueden resolver problemas de gran escala en tiempos de CPU aceptables y con resultados altamente eficientes (óptimos o cuasi-óptimos). Estas estrategias están basadas en el hecho empírico de que las decisiones concernientes a la inyección de un determinado lote están confinadas al propio lote, o a lo sumo a los lotes adyacentes (el previo y el posterior).
- ❖ Los resultados obtenidos al resolver diferentes casos de estudio demuestran la eficiencia del modelo y de las estrategias de descomposición, tanto en la calidad de las soluciones obtenidas como en el tiempo de uso de CPU. En el caso de mayor complejidad resuelto la estrategia *PD* reporta el valor óptimo en 108 segundos, mientras que la técnica alternativa *FD* resuelve el problema en 32 segundos con un Gap de 6.4 %, equivalente a 8500 \$/mes.

Para la misma configuración (única fuente y múltiples destinos) a partir de modificaciones ingeniosas al modelo original, se abordó una política de abastecimiento distinta, comúnmente utilizada en la práctica, que permite la entrega de producto a más de una terminal durante la misma operación, alcanzándose los siguientes resultados:

- ❖ El nuevo modelo matemático que permite derivar producto hacia depósitos intermedios mientras el resto del flujo continua desplazándose aguas abajo con un caudal más bajo fue resuelto satisfactoriamente a bajos tiempos de CPU.

- ❖ Introduce la posibilidad de contemplar la variación de los caudales en los distintos segmentos de la tubería mediante entregas "al paso" con lo cual se evitan detenciones innecesarias de ductos que luego deben ser reactivados y originan mayores costos de energía y de mantenimiento por el uso de bombas impulsoras.
- ❖ La nueva propuesta fue aplicada a los mismos casos de estudio resueltos anteriormente para comparar la calidad de las soluciones, observándose ahorros significativos en costos operativos. La mejor alternativa se obtiene en tan sólo 6.04 segundos de tiempo de CPU y presenta una reducción notoria en cuanto a la cantidad de operaciones efectuadas (33 vs. 53). El ahorro es de aproximadamente un 62 %, lo que equivale a 84450 \$/mes.

La generalización criteriosa del modelo matemático original permitió abordar posteriormente la programación detallada de operaciones de configuraciones de poliductos que presentan múltiples terminales de inyección operando en paralelo. El nuevo enfoque admite la posibilidad de realizar operaciones de inyección de dos o más lotes desde diferentes fuentes. Entre sus principales logros alcanzados se destacan:

- ❖ El modelo fue aplicado a un caso de estudio real que comprende la programación de las operaciones de una parte importante de la red de poliductos con los que cuenta la Argentina.
- ❖ La formulación matemática fue resuelta en tiempos computacionales muy bajos (0.2 s), pese a tratarse de un problema seriamente complejo.
- ❖ Las soluciones obtenidas presentan un menor costo energético con relación a otros métodos, ya que logran mantener un mayor número

de segmentos con flujo en movimiento durante períodos más largos de tiempo.

- ❖ La interacción entre los lotes inyectados se evita incorporando restricciones que prohíben el solapamiento de los segmentos asociados a distintas inyecciones.

En resumen, los principales logros del presente trabajo de tesis son:

- ❖ Haber logrado dar tratamiento a diversos problemas de programación de operaciones logísticas vinculadas con la operación de poliductos, a través del uso de diferentes tipos de herramientas complementarias como los modelos de simulación de eventos discretos, los modelos de programación matemática de tipo lineal mixto entero (MILP), el desarrollo de reglas heurísticas y técnicas de descomposición.
- ❖ Los modelos matemáticos propuestos son de gran utilidad para representar la programación detallada de las operaciones de redes de poliductos con diferentes estructuras y políticas de abastecimiento.
- ❖ Los resultados obtenidos demuestran la eficiencia de las técnicas desarrolladas, que son de gran utilidad para la obtención de buenas soluciones en tiempos computacionales acorde a lo que demanda la práctica.

VII.2. TRABAJOS FUTUROS

Con el aporte de esta tesis, las técnicas de programación detallada de poliductos tratan dos tipos de configuraciones: poliductos con único origen y múltiples destinos, y poliductos con múltiples fuentes y destinos. Queda pendiente el estudio de estructuras más complejas, tales como: poliductos en árbol ("tree-structure pipeline networks") y redes en malla ("mesh-structure pipeline networks"). De acuerdo a la información disponible en la

bibliografía, este tipo de configuraciones ya fueron abordadas a nivel de planificación agregada y se resuelven eficientemente a través de métodos exactos de escala continua de tiempo y volumen. Resta entonces desagregar dichas soluciones para generar el programa detallado de operaciones de corte que permita optimizar la secuencia de arranques y detenciones de las tuberías.

Por otra parte, los modelos de simulación constituyen una herramienta de gestión de gran utilidad para representar el funcionamiento de poliductos, permitiendo una visualización precisa de la operatoria y la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad para estudiar cómo se comporta el sistema ante diferentes modificaciones. En el caso de la configuración más simple abordada (única fuente y múltiples terminales, atendidas de a una por vez), se logró diseñar exitosamente un modelo de simulación de eventos discretos. En el futuro, se pretende ampliar dicho modelo para afrontar el resto de los problemas ya resueltos con modelos de optimización (única fuente con múltiples depósitos que pueden ser atendidos en forma simultánea; y configuraciones con más de una estación de inyección).

Otra tarea pendiente consiste en analizar la robustez del programa de operaciones del poliducto ante incertidumbres en el perfil de demanda de productos en las terminales de destino.

Adicionalmente, se pretende a posteriori desarrollar la formulación de un nuevo modelo matemático MINLP que permita determinar el programa detallado de inyecciones y entregas de combustibles, considerando explícitamente la relación funcional entre costos energéticos y caudales de operación a lo largo del ducto. Comúnmente, la energía necesaria para mover el fluido a través del poliducto está asociada con las diferencias de altura y la pérdida de carga debido a la fricción. Generalmente, en

poliductos de grandes longitudes, la pérdida por fricción es el factor que más requiere de las estaciones de bombeo para mantener el fluido en movimiento y es particularmente sensible a la velocidad del fluido. A través de la conocida ecuación implícita de Colebrook-White se puede realizar un cálculo preciso de la potencia requerida para transportar el fluido dentro de cada segmento del poliducto.

NOMENCLATURA

(a) Conjuntos

B	bloques de inyecciones en paralelo especificados en el plan agregado
I	conjunto ordenado de lotes ($I^{old} \cup I^{new}$)
I_b	lotes en movimiento a través del poliducto durante la ejecución del bloque b
I^{new}	nuevos lotes a inyectar durante el horizonte de planeación
I^{old}	lotes residentes en el poliducto al inicio del horizonte de planeación
J	terminales del poliducto
$J_{i,i'}$	subconjunto de terminales que reciben producto desde el lote i durante la inyección de i'
J'	segmentos del poliducto $\{j_1, \dots, j_\beta\}$
J_r	sucesión de segmentos que conectan la estación de inyección con el destino más alejado durante la corrida de bombeo r
J_r^\oplus	terminales que pueden recibir productos durante la inyección agregada r
$\hat{J}_{i,r}^\oplus$	terminales recibiendo producto del lote i mientras se ejecuta la inyección individual r
K_b	subconjunto de operaciones desagregadas para cumplimentar al bloque de corridas b
R	inyecciones individuales previstas en el plan agregado
R_b	inyecciones agregadas que pertenecen al bloque b
K	conjunto ordenado de operaciones genéricas
K_i	secuencia de operaciones de "corte" requeridas para inyectar el lote i
P	conjunto de productos a transportar
P_i	producto contenido en el lote i

S_{new} subconjunto de lotes nuevos considerados en el sub-problema MILP

(b) Parámetros

$a_{i,r}$ parámetro que denota si el lote en tránsito i recibe una cantidad adicional de producto durante la corrida r , en ese caso $a_{i,r} = 1$

ca costo por unidad de volumen reactivado

cs costo unitario de detención del flujo

$dd_{i,j}^{(i')}$ cantidad a despachar desde el lote i hacia la terminal j durante la inyección del lote i' , especificada en el plan agregado

$dd_{i,j}^{(r)}$ entrega de producto del lote i a la terminal j durante la inyección individual r prescrita en el plan agregado

d_{min} cota inferior para el tamaño de las entregas

fco costo fijo asociado a la ejecución de una operación de entrega

ft_b tiempo de finalización del bloque b especificado en el plan agregado

ft_i tiempo de finalización de la inyección del lote i especificado en el plan agregado

h_{max} duración del horizonte de planificación

$l_{max}^{(i)}$ cota superior para la duración de la inyección del lote i

l_{min} / l_{max} extensión mínima / máxima para las operaciones detalladas

pv volumen total del poliducto

qq_r cantidad ingresada por la corrida r en el nivel agregado

q_{max} volumen máximo permitido para una inyección

qq_i tamaño del lote i dado en el plan agregado

st_i tiempo de iniciación de la inyección del lote i especificado en el plan agregado

st_b tiempo de inicio/finalización del bloque b especificado en el plan agregado

v tamaño de una entidad del modelo de simulación de eventos discretos

- $vb_{\min}^{(i)}/vb_{\max}^{(i)}$ velocidad de inyección mínima/máxima durante la inyección del lote i'
- vd_j caudal máximo de entrega de producto al depósito j
- $vb_{\min}^{(j)}/vb_{\max}^{(j)}$ caudal máximo/mínimo en cada segmento j
- $vb_{\min}^{(r)}/vb_{\max}^{(r)}$ tasa de inyección mínima/máxima durante la corrida r
- $vd_{\max}^{(j)}$ caudal máximo para la entrega de producto a la terminal j
- wo_i contenido inicial del lote i
- σ_j coordenada volumétrica del depósito j medida desde el origen del poliducto

(c) Variables

Variables Continuas

- AV_k volumen activado durante la operación k
- $AV_j^{(k)}$ volumen del segmento j activado durante la operación k
- C_k hora de finalización de la operación k
- $D_{i,j}^{(k)}$ cantidad de producto del lote i entregado al depósito j durante la ejecución de la operación k
- $F_i^{(k)}$ coordenada superior o frontal del lote i al tiempo C_k
- FAT_k coordenada volumétrica de la terminal más lejana recibiendo producto durante la operación k
- L_k Duración de la operación k
- $N_{i,j,k}^{(i)}$ número de entidades del lote i localizadas entre el origen del poliducto y la terminal j en el evento k inyectando el lote i'
- Q_k volumen inyectado en el poliducto durante la operación k
- $Q_{r,k}$ volumen inyectado en el poliducto durante la operación k , correspondiente a la corrida agregada de bombeo r
- SV_k volumen inactivo durante la operación k
- $SV_j^{(k)}$ volumen del segmento j inactivo durante la operación k

Nomenclatura

- $W_i^{(k)}$ volumen del lote i al finalizar la operación k
- $\omega_j^{(k)}$ representa el estado del segmento j relacionado con las terminales activas durante la operación k .

Variables Binarias

- u_k denota la existencia de la corrida k
- $x_{ij}^{(k)}$ denota la ejecución de la operación de entrega desde el lote i al depósito j durante la operación k , si $x_{ij}^{(k)} = 1$.
- $v_j^{(k)}$ denota que el segmento j está activo durante la operación k si $v_j^{(k)} = 1$

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Boschetto, S.N., Magatão, L., Brondani W.M., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., Barbosa-Póvoa A.P.F.D., Relvas, S. (2010). An Operational Scheduling Model to Product Distribution through a Pipeline Network. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 5661–5682.
2. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. (2006). GAMS – A User’s Guide. Washington, DC: GAMS Development Corporation.
3. Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2004). Optimal Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems Using a Non-Discrete MILP Formulation, *Computers & Chemical Engineering* 28 (10), 2053–2068.
4. Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2008). Dynamic Scheduling of Multiproduct Pipelines with Multiple Delivery Due Dates. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 728–753.
5. Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2008). Efficient Tool for the Scheduling of Multiproduct Pipelines and Terminal Operations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 9941–9956.
6. Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2009). Optimal Scheduling of Refined Products Pipelines with Multiple Sources. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, 6675–6689.
7. Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2010). Operational Scheduling of Refined Products Pipeline Networks with Simultaneous Batch Injections. *Computers & Chemical Engineering*, 34, 1687–1704.

8. Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2011). A Rigorous Mathematical Formulation for the Scheduling of Tree-Structure Pipeline Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 5064–5085.
9. Cafaro, D.C., Cerdá, J. (2012). Rigorous Scheduling of Mesh-Structure Refined Petroleum Pipeline Networks. *Computers & Chemical Engineering*, 38, 185–203.
10. Cafaro, V.G., Cafaro, D.C., Méndez C.A., Cerdá, J. (2011). Detailed Scheduling of Operations in Single-Source Refined Products Pipelines. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 6240–6259.
11. Cafaro, V.G., Cafaro, D.C., Méndez, C.A., Cerdá, J. (2010) Oil-Derivatives Pipeline Logistics Using Discrete-Event Simulation. *Proceedings-Winter Simulation Conference*, art. 5678864, 2101–2113. ISBN: 978-1-4244-9864-2.
12. Cafaro, V.G., Cafaro, D.C., Méndez, C.A., Cerdá, J. (2011) New Tools for the Detailed Scheduling of Refined Products Pipelines. *Computer Aided Chemical Engineering*, 29, 985–989. ISBN: 978-0-444-53895-6.
13. Cafaro, V.G., Cafaro, D.C., Mendez, C.A., Cerda, J. (2011) Transportation: Special report: Multiproduct operations I – Discrete-event simulation guides pipeline logistics. *Oil and Gas Journal*, 109, 91 – 100+102–104.
14. Cafaro V.G., Cafaro, D.C., Méndez C.A., Cerdá, J. (2012). Detailed Scheduling of Single-Source Pipelines with Simultaneous Deliveries to

- Multiple Offtake Stations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 6145–6165.
15. Castro, P.M. (2010). Optimal Scheduling of Pipeline Systems with a Resource–Task Network Continuous–Time Formulation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 11491–11505.
16. 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.
17. Hane, C.A.; Ratliff, H.D (1995). Sequencing Inputs to Multi–Commodity Pipelines. *Annals of Operations Research*, 57, 73–101.
18. Herrán, A., de la Cruz, J.M., de Andrés, B. (2010). A Mathematical Model for Planning Transportation of Multiple Petroleum Products in a Multi–Pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*, 34, 401–413.
19. Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T. (2007). *Simulation with Arena. Fourth Edition. New York: McGraw–Hill Inc.* ISBN: 978–0–07–352341–5.
20. Lopes, T.M.T., Ciré, A.A., de Souza, C.C., Moura, A.V. (2010). A Hybrid Model for a Multiproduct Pipeline Planning and Scheduling Problem. *Constraints*, 15, 151–189.
21. 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.

22. Miesner, T.O., Leffler, W. L. (2006). *Oil & Gas Pipelines in Nontechnical Language*. Pennwell: Tulsa, USA. ISBN: 978-1-59370-058-4.
23. MirHassani, S.A., Jahromi, H.F. (2011). Scheduling Multi-Product Tree-Structure Pipelines. *Computers & Chemical Engineering*, 35, 165-176.
24. Mori, F.M., Lüders, 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 Real-World Pipeline Network. *Computer Aided Chemical Engineering*, 24, 691-696.
25. Moura, A.V., de Souza, C.C., Cire, A.A., Lopes, T.M. (2008). Planning and Scheduling the Operation of a Very Large Oil Pipeline Network. *Lecture Notes in Computer Science*, 5202, 36-51.
26. 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.
27. 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.
28. 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.

29. Rejowski, R.; Pinto, J.M. (2003). Scheduling of a Multiproduct Pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 1229–1246.
30. Rejowski, R.; Pinto, J.M. (2004). Efficient MILP Formulations and Valid Cuts for Multiproduct Pipeline Scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 1511–1528.
31. Rejowski, 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.
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. Zyngier, D., Kelly, J.D. (2009). Multi-Product Inventory Logistics Modeling in the Process Industries. *Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise*, 30, 61–95.

ISBN 978-987-33-6573-7



9 789873 365737