



## DISEÑO DINÁMICO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES PARA LA OPERACIÓN DE CAMPOS DE GAS Y PETRÓLEO

Vito Stamatti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina

Director: Cafaro Diego

Co-Director: Montagna Agustín

Área: Ingeniería

### INTRODUCCIÓN

Una cadena de suministros (CS) consiste en una red de instalaciones (plantas de manufactura, almacenes y centros de distribución) que realizan un amplio rango de operaciones con el propósito de abastecer la demanda de ciertos productos/servicios (finales o intermedios) durante un cierto horizonte de planeación. Diseñar una CS implica determinar la ubicación y el tipo de instalaciones a ser utilizadas; seleccionar proveedores; y determinar productos a ser almacenados, políticas de inventario y modos de transporte a emplear. Asimismo, la operación de la CS debería ser planeada teniendo en cuenta el nivel de servicio (NS) exigido por los consumidores. Cabe destacar que el diseño de una CS involucra importantes inversiones que normalmente afrontan largos períodos de recupero. Por esta razón, en general no se permiten rediseños de la CS, lo cual atenta contra la eficiencia en las operaciones de suministro, de acuerdo a Melo y col. (2009). Sin embargo, trabajos recientes han considerado la posibilidad de que ciertos recursos puedan ser reubicados o redimensionados. Particularmente, de acuerdo a Melo y col. (2003), este concepto es comúnmente aplicado a relocalizaciones graduales, expansiones y/o reducciones en instalaciones de almacenamiento/producción durante el horizonte de planeación. Adicionalmente, Barbosa-Póvpa y col. (2018) encontraron que un gran porcentaje de trabajos (73%) relacionados al diseño de CS modela el problema desde una perspectiva estática, y el restante (23%) incluye estructuras dinámicas.

En el presente trabajo, se aplican los conceptos generales del diseño dinámico de CS a la problemática particular de suministro de combustibles para el desarrollo de las operaciones en campos de petróleo y gas. Tavallali y col. (2014 y 2016) destacan las características intrínsecamente dinámicas de estas actividades, en las cuales el diseño y la planeación de la infraestructura resultan altamente complejos e involucran numerosas decisiones en el tiempo.

### PLANTEO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El diseño dinámico de la CS para la distribución de combustibles abordado contempla un conjunto  $I=\{G1,G2\}$  formado por los dos grados de gasoil requeridos para efectuar las operaciones en un conjunto  $J=\{1, 2, \dots, m\}$  de campos de petróleo y gas, a lo largo de un horizonte de tiempo  $\tau =\{1, 2, \dots, h\}$  (períodos anuales). La demanda de gasoil de *grado 2* (G2) está determinada por las operaciones de perforación, terminación, pulling y mantenimiento. En el caso del gasoil de *grado 3* (G3), se emplea en las bombas para la estimulación de las fracturas hidráulicas de un nuevo pozo no convencional. Cada campo  $j$  posee una ubicación geográfica y una demanda anual  $D_{i,j,\tau}$  (MMlt) de  $i$  para el año  $\tau$ . El combustible puede ser adquirido de un conjunto de proveedores o refinerías  $S=\{1, 2, \dots, r\}$ , con sus respectivas localizaciones y capacidades de aprovisionamiento. El objetivo principal es determinar el número y la ubicación de un grupo de tanques de almacenamiento (ST) a largo de un conjunto  $A=\{1, 2, \dots, p\}$  de nodos potenciales para su colocación. Los ST pueden ser de dos tipos: *fijos* o *móviles*. Si un nodo  $a$  es seleccionado para un ST de tipo *fijo*, la variable binaria  $vf_a$  toma el valor uno, debiendo decidirse además el tamaño  $t$  (*Grande* o *Mediano*) del mismo a través de la variable  $w_{a,t}$  (Ec. 1). Por otro lado, cuando un nodo  $a$  es adoptado como ST, la variable binaria  $q_{i,a}$  indica si el combustible  $i$  es almacenado en el mismo. El uso de ST *móviles* tiene como fin

hacer frente a las distribuciones asimétricas de la demanda a lo largo del horizonte de planeación, como también a la gran dispersión geográfica de los campos de gas y petróleo. Si un *ST móvil* es seleccionado para operar en un nodo  $a$ , almacenando el combustible  $i$ , en el período  $\tau$ , entonces se activa la variable binaria  $vm_{a,i,\tau}$ . La Ec. (1) exige también que un solo tipo de *ST (móvil o fijo)* se puede adoptar en un determinado nodo  $a$ .

$$\sum_t w_{a,t} = vf_a \quad \forall a ; q_{i,a} \leq vf_a \quad \forall i,a ; \sum_i vm_{a,i,\tau} \leq 1 \quad \forall a,\tau ; \sum_i vm_{a,i,\tau} \leq (1 - vf_a) \quad \forall a,\tau \quad (1)$$

Se establece que, si un combustible  $i$  es asignado a un *ST fijo* de tamaño  $t$ , debe operarse en una cantidad mínima  $qf_{i,t}^{lo}$  en cada período; y respetar al mismo tiempo las capacidades máximas  $qf_{i,t}^{up}$  de cada instalación (Ec. 2). Adicionalmente, son establecidos límites globales para flujo total capaz de ser gestionado en un determinado *ST* de tamaño  $t$ . La Ec. 3 relaciona las variables binarias, introduciendo la variable  $wq_{i,a,t}$ , la cual vale uno cuando  $w_{a,t}$  y  $q_{i,a}$  están activas. Similares restricciones son impuestas para el caso de *ST móviles*. (Ec. 4).

$$\sum_t qf_{i,t}^{lo} wq_{i,a,t} \leq QA_{i,a,\tau} \leq \sum_t qf_{i,t}^{up} wq_{i,a,t} ; \sum_t tq_{i,t}^{lo} w_{a,t} \leq QT_{a,\tau} \leq \sum_t tq_{i,t}^{up} w_{a,t} \quad \forall a, i, \tau \quad (2)$$

$$wq_{i,a,t} \leq w_{a,t} ; wq_{i,a,t} \leq q_{i,a} ; wq_{i,a,t} \geq q_{i,a} + w_{a,t} - 1 \quad \forall i, a, t \quad (3)$$

$$\sum_t qm_{i,t}^{lo} vm_{a,i,\tau} \leq \sum_j QMJ_{i,a,j,\tau} \leq \sum_t qm_{i,t}^{up} vm_{a,i,\tau} \quad \forall a, i, \tau \quad (4)$$

Para satisfacer la demanda de cada  $j$ , las variables positivas  $QAJ_{i,a,j,\tau}$  y  $QMJ_{i,a,j,\tau}$  contabilizan el flujo anual de  $i$  hacia  $j$  desde un *ST fijo* o *móvil*, respectivamente. El flujo total hacia un campo debe ser igual a su demanda (Eq. 6). Por otro lado, se deben considerar los flujos de la logística primaria y la intermedia. La variable  $QRA_{i,s,a,\tau}$  representa la cantidad anual comprada de  $i$  a  $r$  y enviada a un depósito ubicado en  $a$ . Similarmente, los flujos entre *ST* son registrados en la variable  $QAA_{i,a,a',\tau}$ . Cabe destacar que este movimiento entre *ST* solo es permitido desde *fijos* hacia *móviles*. La Ec. (7) computa los flujos anuales totales por tipo de combustible y nodo. Por último, se debe garantizar que todos los flujos de entrada en cada nodo intermedio sean iguales a los de salida, aspecto modelado en la Ec. (8).

$$D_{i,j,\tau} = \sum_a QAJ_{i,a,j,\tau} + \sum_a QMJ_{i,a,j,\tau} \quad \forall i, j, \tau \quad (6)$$

$$QA_{i,a,\tau} = \sum_i QRA_{i,s,a,\tau} \quad \forall i, a, \tau ; QT_{a,\tau} = \sum_i QA_{i,a,\tau} \quad \forall a, \tau \quad (7)$$

$$QA_{i,a,\tau} = \sum_{a' \neq a} QAA_{i,a,a',\tau} + \sum_j QAJ_{i,a,j,\tau} ; \sum_{a' \neq a} QAA_{i,a',a,\tau} = \sum_j QMJ_{i,a,j,\tau} \quad \forall a, i, \tau \quad (8)$$

La Ec. (10) relaciona las variables binarias  $vf_a$ ,  $vm_{i,a,\tau}$  y  $q_{i,a,\tau}$ , con sus correspondientes variables positivas. Siguiendo una lógica similar, la decisión de adquirir combustible de una refinería es representada por la variable binaria  $vp_{i,r}$ . Adoptar una fuente  $r$  como proveedor implica considerar flujos mínimos para su activación, y máximos debido a las capacidades intrínsecas de la misma (Ec. 11). Para determinar las relaciones entre los diferentes tipos de nodos, nuevas variables binarias son introducidas: (1)  $zf_{i,a,j,\tau}$  es igual a uno si el *ST fijo* en el nodo  $a$  abastece al campo  $j$  con  $i$  durante  $\tau$ , y (2)  $zm_{i,a,j,\tau}$  estará activa si un *ST móvil* en el nodo  $a$  abastece  $j$  con  $i$  durante  $\tau$ . Estas variables están relacionadas con las anteriores a través de las ecuaciones correspondientes. Por otro lado, es necesario hacer un seguimiento del número total de *ST móviles* activos ( $Am_\tau$ ) para poder registrar los costos e inversiones por funcionamiento, relocalizaciones y cierres a lo largo del horizonte de planeación (Ec. 12). Para ello, se plantea el balance de *ST móviles*, donde las variables  $Om_\tau$  y  $Cm_\tau$  computan la cantidad de *ST* abiertos y cerrados en cada período, respectivamente.

$$QAJ_{i,a,j,\tau} \leq D_{i,j,\tau} \cdot vf_a ; QAJ_{i,a,j,\tau} \leq D_{i,j,\tau} \cdot q_{i,a,\tau} ; QMJ_{i,a,j,\tau} \leq D_{i,j,\tau} \cdot vm_{i,a,\tau} \quad \forall i, a, j, \tau \quad (10)$$

$$qp_{i,r}^{lo} \cdot vp_{i,r} \leq \sum_a QRA_{i,r,a,\tau} \leq qp_{i,r}^{up} \cdot vp_{i,r} \quad \forall r, i, \tau \quad (11)$$

$$Am_\tau = \sum_a \sum_t vm_{a,i,\tau} \quad \forall a, i, \tau ; Am_\tau = Am_{\tau-1} + Om_\tau - Cm_\tau \quad \forall \tau \quad (12)$$

### Función objetivo económica

Resulta necesario contabilizar tanto los costos de inversión como los operativos. Por un lado, la instalación e inversión de un *ST fijo* se considera al comienzo del horizonte de planeación ( $If_t$ ). En el caso de los *ST móviles*,  $Im$  y  $Cim$  computan los desembolsos de capital por la adquisición de un nuevo tanque de almacenamiento y/o el cierre de uno existente. La Ec. 13 registra las inversiones en *ST fijos* ( $CEF$ ) y *móviles* ( $CEM_\tau$ ).  $TPC_\tau$  representa el costo anual total por adquisición de gasoil, siendo  $cp_{i,r}$  el costo de compra de combustible. Respecto a los costos fijos anuales  $TFC_\tau$  (Ec. 14), los mismos son incurridos por cada *ST* activo, dependiendo de su tipo y tamaño ( $fcf_t$  /  $fcm$ ). El costo operativo unitario,  $ocf_t$  o  $omc$ , es incurrido por el mantenimiento de combustible  $i$  en un *ST fijo* o *móvil* en el año  $\tau$ , respectivamente. Las Ec. 15 y 16 modelan estos costos y los consolidan en el costo anual operativo  $TOC_\tau$ .

$$CEF = \sum_a \sum_t If_t \cdot w_{a,t} ; CEM_\tau = Om_\tau \cdot Im + Cm_\tau \cdot Cim \quad \forall \tau \quad (13)$$

$$TPC_\tau = \sum_a \sum_i \sum_r QRA_{i,r,a,\tau} \cdot cp_{i,r} \quad \forall \tau ; TFC_\tau = \sum_a \sum_t fcf_t \cdot w_{a,t} + Am_\tau \cdot fcm \quad \forall \tau \quad (14)$$

$$TOC_\tau = \sum_a \sum_i \sum_t QAT_{i,a,t,\tau} \cdot ocf_t + QMJ_{i,a,j,\tau} \cdot omc \quad \forall \tau \quad (15)$$

$$\sum_t QAT_{i,a,t,\tau} = QA_{i,a,\tau} ; QAT_{i,a,t,\tau} \leq qf_{i,t}^{up} \cdot w_{a,t} \quad \forall i, a, t, \tau \quad (16)$$

Respecto al costo de transporte anual ( $TTC_\tau$  – Ec. 17), el mismo dependerá de los tipos de nodos conectados. Particularmente,  $vtc1$  representa el costo unitario de transporte (US\$/km.lit) entre refinerías y *ST fijos*,  $vtc2$  entre depósitos *fijos* y *móviles*, y  $vtc3$  para abastecer un nodo de demanda final. La capacidad de respuesta de la CS se mide a partir de la definición de objetivos en el nivel de servicio ( $SL$ ), el cual está compuesto por el tiempo total disponible  $TT$  para abastecer un determinado punto de demanda. Conociendo la velocidad promedio y las distancias, se puede calcular fácilmente el *lead-time* para unir dos nodos ( $LT_{a,j}$ ). La Ec. (18) efectiviza la restricción sobre el  $SL$ , siendo el parámetro  $Demp_{i,j}$  la demanda promedio de combustible  $i$  en el campo  $j$ . Finalmente, como función objetivo para el diseño de la CS se plantea la minimización del valor actual neto de todos los costos (Ec. 19).

$$TTC_\tau = \sum_{r,a,i} Dist_{r,a} \cdot vtc1 \cdot QRA_{i,r,a,\tau} + \sum_{a,a',i} Dist_{a,a'} \cdot vtc2 \cdot QAA_{i,a,a',\tau} + \sum_{a,j,i} Dist_{a,j} \cdot vtc3 \cdot (QAJ_{i,a,j,\tau} + QMJ_{i,a,j,\tau}) \quad (17)$$

$$(QMJ_{i,a,j,\tau} + QAJ_{i,a,j,\tau})LT_{a,j} \leq Demp_{i,j} TT \quad \forall i, a, j, \tau \quad (18)$$

$$Min \quad NPC = CEF + \sum_\tau \frac{(CEM_\tau + TPC_\tau + TTC_\tau + TFC_\tau + TOC_\tau)}{(1 + \phi)^{\tau-1}} \quad (19)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizó un caso de estudio ilustrativo compuesto por diferentes patrones de demanda para cada campo, junto con niveles de servicio crecientes, con el objetivo de evaluar la potencialidad del modelo propuesto. El número total de instalaciones *fijas* y *móviles* posibles de instalar es restringido en base a un presupuesto limitante. En la Tabla 1 se exponen los principales parámetros utilizados en el modelo y los cambios realizados en cuanto al  $TT$  para cada escenario propuesto. Finalmente se analizó un problema real con un mayor número de nodos de demanda (74) y nodos potenciales en la red (74), dando como resultado un modelo de más de 550k variables continuas, 190k binarias y 960k ecuaciones. La formulación fue desarrollada

para todos los casos en el entorno GAMS 24.7 utilizando CPLEX 12.6 como resolutor, en un procesador Intel Xeon X5650 con 2.67 GHz CPU y 24GM RAM.

**Tabla 1:** Parámetros utilizados en el caso de estudio para cada escenario.

Tipo de ST	$lf_t$	Costos MMUS\$		Capacidad [MMlt]	Costos de Transporte [MMUS\$]		Esc.	TT [hs]
		$fcf_t$	$ocf_t$	$tq_{it}^{lo} / tq_{it}^{up}$	vtc1	vtc2		
Fijo Grande	0.58	0.22	0.04	20/36	vtc1	660	1	INF
Fijo Mediano	0.43	0.14	0.05	7.5/21.5	vtc2	660	2	2
Móvil	$Im / Cim$	$Fcm$	$ocm$	$qm_{it}^{lo} / qm_{it}^{up}$	vtc3	1320	3	1.2
	0.15/0.03	0.09	0.07	0.05/9				

**Tabla 2:** Resultados del caso de estudio con sus costos y estadísticas de resolución.

Escenario	1	2	3	Problema Real
Nº ST Grande/Mediano/Móvil	1 / 1 / 1	- / 3 / 2	- / 3 / 6	2 / 2 / 9
NPC / TI	38.89 / 1.35	40.13 / 1.61	71.8 / 2.22	714 / 3.41
$TFC_r / TOC_r$	2.3 / 9.61	3.23 / 9.84	5.53 / 23.67	24.7 / 6.88
$TTC_r$	30.25	29.76	54	169.76
Ecuaciones	43,210	43,210	43,210	960,323
Variables Positivas/Enteras	37,515/8,534	37,515/8,534	37,515/8,534	559,301/191,184
Tiempo CPU (s)/GAP	5.48/0	32.19/0	33.61/0	16,826 / 0,06

## CONCLUSIONES

Se ha presentado una novedosa formulación MILP para el diseño óptimo de la Cadena de Suministros de gasoil a operaciones de upstream en campos de petróleo y gas. Las principales diferenciaciones introducidas consisten en: (1) utilización de Tanques de Almacenamiento Móviles, aportando carácter dinámico al diseño con el fin de enfrentar de forma eficiente las inestabilidades en los patrones de demanda y la asimetría geográfica de los campos a abastecer; y (2) introducción de las economías de escalas presentes en inversiones y costos operativos a través de la utilización de ST con tamaños y características distintas. Futuros trabajos deberán enfocarse en el desarrollo de estrategias de resolución más eficientes para poder aplicar el modelo a casos de estudio y problemas industriales mayores.

## BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Ballou R. H.**, 2003. Business Logistics: Supply Chain Management. 5<sup>th</sup> Edition, Pearson Education, Limited.
- Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F.**, 2009. Facility location and supply chain management – A review. European Journal of Operational Research 196, 401–412.
- Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F.**, 2003. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. Computer & Operations Research 33, 181 – 208.
- Barbosa-Póvoa A. P., da Silva C., Carvalho A.**, 2018. Opportunities and Challenges in Sustainable Supply Chain: An Operations Research Perspective. European Journal of Operations Research 268, 399 – 431.
- Tavallali M. S., Karimi I. A., Baxendale D.**, 2016. Process Systems Engineering Perspective on the Planning and Development of Oil Fields. American Institute of Chemical Engineers 62 (8), 2586 – 2604.
- Tavallali M. S., Karimi I.**, 2014. Perspectives on the Design and Planning of Oil Field Infrastructure. Computer Aided Chemical Engineering 34, 163-172.