

PROGRAMACION DE OPERACIONES EN UNA REFINERIA CON ACCESO MARÍTIMO

Tomás García García-Verdier^{a*}, Gloria Gutiérrez^a, Carlos G. Palacín^a, Carlos Méndez^b, César de Prada^a

^aDpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid
Calle Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid

^bCenter for Advanced Process Systems Engineering (CAPSE), INTEC (UNL - CONICET), Dpto. Ingeniería Industrial (FIQ-UNL), Güemes 3450, 3000, Santa Fe, Argentina

{tomasjorge.garcia@uva.es | gloria@autom.uva.es | carlos.gomez@autom.uva.es | cmendez@intec.unl.edu.ar | prada@autom.uva.es}

Resumen

El presente trabajo se centra en la optimización de la programación de operaciones llevadas a cabo en un sistema compuesto por una refinería y una terminal marítima.

El principal desafío radica en coordinar las decisiones que se tomen en ambas instalaciones, y lograr una solución óptima en términos económicos.

A partir de la premisa mencionada anteriormente, se presenta la formulación de un modelo de programación matemática mixto entero no lineal con representación continua del tiempo. Dicho modelo es capaz de dar soporte al proceso de toma de decisiones en forma integral.

Palabras clave: Programación mixta entera no lineal; Representación continua de tiempo; Programación de crudo de petróleo; Refinería; Terminal marítima.

1 INTRODUCCIÓN

Las refinerías son instalaciones petroquímicas que transforman el crudo de petróleo en una gran cantidad de productos refinados. Pertenecen al nivel medio de la cadena de suministro de la industria petrolera.

Las decisiones que se toman en la programación de operaciones (*scheduling*) de una refinería tienen un fuerte impacto en el costo total de la cadena de suministro; por lo tanto, deben gestionarse cuidadosamente. El desafío consiste en llevar a cabo esta tarea de manera eficiente y con un alto nivel de confianza de manera que las soluciones obtenidas resulten competitivas económicamente y den seguridad al usuario. A raíz de lo mencionado previamente, la programación matemática asume un rol protagonista en el desarrollo de esta actividad.

Existe una gran variedad de trabajos que abordan este problema, entre los que destacan Furman et al. [2], Jia

et al. [5] y Lee et al. [6]. En los mismos se contemplan refinerías compuestas por tanques de almacenamiento y carga por separado. Los tanques de almacenamiento se encargan de recibir y almacenar los crudos descargados desde los barcos; en cuanto a los tanques de carga, estos se utilizan para la preparación de mezclas de crudos que alimentan a las unidades de destilación.

Un número menor de trabajos se ha centrado en refinerías de petróleo sin tanques de carga. En dichas refinerías, las mezclas de crudos se llevan a cabo en los tanques de almacenamiento y en los ductos que alimentan a las unidades de destilación. Algunos de los trabajos más relevantes son Cerdá et al. [1], Pinto et al. [7] y Reddy et al. [8], en los cuales se desarrollan modelos de programación matemática mixta entera lineal (*MILP*) y no lineal (*MINLP*) con representación continua del tiempo.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En muchas ocasiones, el suministro de crudo a una refinería se da a través de barcos los cuales arriban a una terminal marítima próxima a la misma. Dicho sistema refinería-terminal está conectado por uno o varios oleoductos que son utilizados para transferir el crudo desde los buques hasta los tanques de almacenamiento presentes en la refinería.

En la Figura 1 se muestra un esquema con las operaciones e instalaciones características de una refinería con acceso marítimo. En este caso concreto, el mismo se compone de instalaciones de descarga tales como un sistema de amarre a punto único o monoboya y un oleoducto. Luego, en refinería, se encuentran las instalaciones de almacenamiento y procesamiento: un parque de tanques de almacenamiento y un conjunto de unidades de destilación de crudo.

Las operaciones involucradas son: la descarga de crudo desde barcos a tanques a través del oleoducto;

el almacenamiento y mezcla de crudos en tanques; y el suministro de mezclas a las unidades de destilación provenientes de uno o más tanques con caudales variables a lo largo del horizonte de planificación.

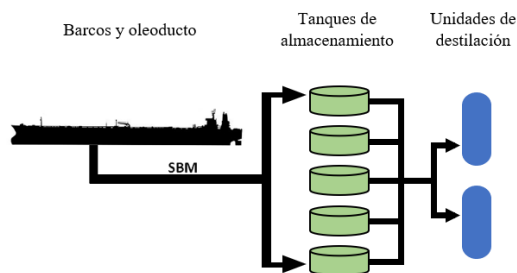


Figura 1: Esquema general de operaciones e instalaciones de una refinería de petróleo.

La integración de este sistema implica un desafío sumamente complejo debido a la necesidad de coordinar las decisiones tomadas tanto en la terminal como en la refinería. La dificultad de esta sincronización radica en el compromiso existente entre los objetivos de la terminal y los objetivos de la refinería; mientras que el primero se interesa en descargar los barcos lo más pronto posible, para evitar costos por demoras, el segundo se preocupa por disponer de crudos en los momentos y cantidades más convenientes para cumplir con el plan de producción.

Para abordar este problema, se propone un modelo matemático que optimiza de manera integral las actividades llevadas a cabo a corto plazo en el sistema refinería-terminal, teniendo en cuenta restricciones operativas.

2.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

Los datos disponibles para resolver el problema son los siguientes: la fecha de arribo de los barcos a lo largo del horizonte de planificación, la fecha esperada de partida de los barcos, volumen y tipo de crudo transportado; la configuración de las instalaciones de descarga tales como el número de puntos de amarre, oleoductos y límites en el caudal de transferencia; el número de tanques de almacenamiento en refinería, sus capacidades, inventario inicial así como también los límites en los caudales de descarga desde tanques a unidades de destilación; información respecto a las unidades, tales como, las especificaciones de calidad que deben cumplir las mezclas de alimentación y los límites en los caudales de procesamiento; por último, datos económicos, entre los que se incluyen, costos de espera de barcos en el mar y de partida tardía, costos asociados a cambios en los tanques de alimentación (*changeover*), costos por falta o exceso de producción, ingresos por procesamiento de crudos e información respecto a la demanda de las unidades de destilación.

3 FORMULACION DEL MODELO

A continuación, se presenta la formulación del modelo *MINLP* con representación continua del tiempo, el cual se basa en la formulación propuesta por Reddy et al. [8]. Con el fin de no exceder la cantidad aconsejada de páginas, la nomenclatura de los conjuntos, parámetros y variables se presenta en un apéndice de soporte, al final del documento.

Es menester aclarar que, en los artículos citados, el orden de descarga de los barcos se encuentra preestablecido para lo cual se aplica la política de “primero en llegar, primero en ser atendido”. Sin embargo, el modelo propuesto en este trabajo permite optimizar dicha decisión ya que, a diferencia de los anteriores, la precedencia entre barcos no depende exclusivamente de los tiempos de arribo, sino que también se determina según los costos operativos evaluados en la función objetivo. Concretamente, la precedencia entre barcos no está sujeta al orden de los elementos del conjunto B, como se plantea en Cerda et al. [1], y tampoco existe una preasignación de *slots* de tiempo para cada barco como sucede en Reddy et al. [8]. En el presente trabajo se emplea una “precedencia predefinida” que tiene el conjunto de *slots* preordenado, y el algoritmo de optimización sólo debe disponer cada barco en uno de esos períodos de tiempo; Gómez Palacín, C. et al. [3,4].

Además, es importante destacar las siguientes características del modelo: se definen tres estados mutuamente excluyentes para los tanques (carga, descarga y reposo); los *slots* de tiempo son de duración variable y son comunes para todos los tanques; se activa un nuevo *slot* siempre que ocurra un cambio de estado en alguno de los tanques, por lo que, las actividades llevadas a cabo durante un *slot* fijan la duración de dicho *slot*.

3.1 OBJETIVO

El objetivo del modelo es maximizar el beneficio total a lo largo del horizonte de planificación, es decir, la diferencia entre los ingresos obtenidos del procesamiento de crudos y los costos operativos teniendo en cuenta el cumplimiento de la demanda y las restricciones de capacidad y operación.

3.2 SUPUESTOS DEL MODELO

La formulación del modelo propuesto se basa en las siguientes suposiciones:

- 1) Existe un único punto de amarre y un oleoducto que conecta a la terminal con la refinería, por lo tanto, solo es posible descargar un barco a la vez.

- 2) Un buque que haya iniciado su descarga de crudo sólo puede abandonar la terminal una vez que se vacíe completamente.
- 3) Se supone que cada barco transporta un único tipo de crudo y se considera que el volumen de crudo retenido en el oleoducto (*holdup*) es despreciable frente a la cantidad a descargar.
- 4) Un tanque de almacenamiento no puede recibir crudo desde un barco y alimentar a una unidad de destilación simultáneamente. Además, debe permanecer inactivo durante un determinado tiempo después de haber recibido una carga desde un barco.
- 5) Se permite, como máximo, la carga de cuatro tanques simultáneamente y no se permiten transferencias entre tanques.
- 6) Un tanque puede alimentar como máximo a dos unidades de destilación de manera simultánea.
- 7) Una unidad de destilación puede ser alimentada, como máximo, por tres tanques a la vez.
- 8) Se asume mezcla perfecta en cada tanque y se consideran despreciables los tiempos de cambio.
- 9) Cuando una unidad de destilación es alimentada por más de un tanque, se considera que los caudales provenientes de cada tanque se mezclan perfectamente en la tubería.
- 10) No se puede detener la alimentación a las unidades de destilación.

3.3 Restricciones

A partir de la restricción (1) se define que un barco se descarga durante el *slot* s si estaba descargándose durante el *slot* anterior y todavía no ha finalizado, o si comienza su descarga al inicio del *slot* actual.

$$x_{b,s} = x_{b,s-1} + x_{id,b,s} - x_{fd,b,s-1} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (1)$$

Un barco puede concluir su descarga al final de un determinado *slot* siempre y cuando se estuviera descargando durante dicho *slot*.

$$x_{b,s} \geq x_{fd,b,s} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (2)$$

Todos los barcos deben iniciar (3) y finalizar (4) su descarga dentro del horizonte de planificación.

$$\sum_s x_{id,b,s} = 1 \quad \forall b \in B \quad (3)$$

$$\sum_s x_{fd,b,s} = 1 \quad \forall b \in B \quad (4)$$

No se permite la descarga de más de un barco a la vez (5). Se establece una cantidad máxima de tanques que pueden ser cargados en paralelo (6).

$$\sum_b x_{b,s} \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_q x_{q,s} \leq \text{Tanques_barco} \quad \forall s \in S \quad (6)$$

Si un barco se encuentra descargando crudo entonces debe haber, al menos, un tanque recibiendo ese crudo (7). Un tanque puede ser cargado siempre y cuando se esté descargando un barco (8).

$$\sum_q x_{q,s} \geq x_{b,s} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (7)$$

$$x_{q,s} \leq \sum_b x_{b,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (8)$$

Cantidad máxima de unidades que puede alimentar simultáneamente un mismo tanque (9). Cantidad máxima de tanques que admite simultáneamente una misma unidad (10).

$$\sum_u y_{q,u,s} \leq C_{dus_tanque} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (9)$$

$$\sum_q y_{q,u,s} \leq \text{Tanques_cdu} \quad \forall s \in S, u \in U \quad (10)$$

Cada unidad de destilación debe ser alimentada constantemente (11).

$$\sum_q y_{q,u,s} \geq 1 \quad \forall s \in S, u \in U \quad (11)$$

Un tanque debe encontrarse en un único estado por *slot* (12).

$$x_{q,s} + y_{q,s} + z_{q,s} = 1 \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (12)$$

Si un tanque se encuentra alimentando a una unidad significa que ese tanque se encuentra en estado de descarga (13).

$$y_{q,s} \geq y_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (13)$$

Y viceversa, si un tanque se encuentra en modo de descarga significa que está alimentando a una o más unidades (14).

$$\sum_u y_{q,u,s} \geq y_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (14)$$

El fin de un *slot* es igual a su inicio más su duración (15). Y el inicio de un *slot* coincide con el fin del *slot* anterior (16). La sumatoria de la duración de todos los *slots* debe ser igual a la duración del horizonte de planificación (17).

$$ts_s = is_s + ds_s \quad \forall s \in S \quad (15)$$

$$is_s = ts_{s-1} \quad \forall s, (s-1) \in S \quad (16)$$

$$\sum_s ds_s = H \quad (17)$$

La duración de un *slot* es igual al tiempo de carga descarga o reposo. Los *slots* son comunes para todos los tanques (18).

$$ds_s = dcq_{q,s} + ddq_{q,s} + diq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (18)$$

Se aplica la técnica *big-M*, explicada por Winston y Goldberg [9], en la definición de las variables de duración, (19) a (23).

$$ddb_{b,s} \leq H * xb_{b,s} \quad \forall b \in B, s \in S \quad (19)$$

$$dcq_{q,s} \leq H * xq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (20)$$

$$ddq_{q,s} \leq H * yq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (21)$$

$$diq_{q,s} \leq H * zq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (22)$$

$$ddqu_{q,u,s} \leq H * y_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (23)$$

La duración de la descarga de un barco a un tanque no puede ser mayor que la duración de la carga de dicho tanque (24).

$$\sum_b ddbq_{b,q,s} \leq dcq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (24)$$

La sumatoria de los tiempos en los que un barco descarga a un conjunto de tanques debe ser menor al tiempo de descarga del barco multiplicado por la cantidad máxima admitida de carga de tanques en paralelo (25).

$$\sum_q ddbq_{b,q,s} \leq \text{Tanques_barco} * ddb_{b,s} \quad (25)$$

$$\forall b \in B, s \in S$$

La duración de la descarga de un barco no puede superar a la duración del *slot* correspondiente (26).

$$\sum_b ddb_{b,s} \leq ds_s \quad \forall s \in S \quad (26)$$

La sumatoria de tiempos de tanques cargados en paralelo no puede ser superior a la longitud del *slot*

multiplicado por la cantidad máxima de tanques admitida (27).

$$\sum_q dcq_{q,s} \leq \text{Tanques_barco} * ds_s \quad \forall s \in S \quad (27)$$

La duración de la carga de un tanque no puede ser positiva si no hay un barco descargando (28).

$$dcq_{q,s} \leq \sum_b ddb_{b,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (28)$$

El tiempo de alimentación a una unidad desde un determinado tanque no puede ser superior al tiempo en que dicho tanque se encuentra descargando (29).

$$ddq_{q,s} \geq ddqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (29)$$

La sumatoria de las duraciones de alimentación en paralelo desde un tanque a las unidades debe ser, al menos, el tiempo de descarga de dicho tanque (30).

$$\sum_u ddqu_{q,u,s} \geq ddq_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (30)$$

Si un tanque alimenta a una unidad entonces la duración de esta tarea debe ser, al menos, igual al tiempo en que ese tanque se encuentra en modo descarga (31).

$$ddqu_{q,u,s} \geq ddq_{q,s} - H * (1 - y_{q,u,s}) \quad (31)$$

$$\forall s \in S, q \in Q, u \in U$$

La duración de descarga desde un barco a un determinado tanque debe ser mayor o igual a la duración del *slot* (32).

$$ddbq_{b,q,s} \geq dcq_{q,s} + ddb_{b,s} - ds_s \quad (32)$$

$$\forall s \in S, b \in B, q \in Q$$

A partir de las restricciones (33) y (34) se define el volumen cargado a cada tanque *q* desde el barco *b* durante el *slot* *s*.

$$fbq_{b,q,s} \leq \text{Carga_max_q} * ddbq_{b,q,s} \quad (33)$$

$$\forall s \in S, b \in B, q \in Q$$

$$fbq_{b,q,s} \geq \text{Carga_min_q} * ddbq_{b,q,s} \quad (34)$$

$$\forall s \in S, b \in B, q \in Q$$

El volumen de crudo descargado desde un barco durante un *slot* *s* es igual a la suma de volúmenes descargados en cada tanque (35).

$$fcb_{c,b,s} = \sum_q fcbq_{c,b,q,s} \quad \forall s \in S, b \in B, c \in C \quad (35)$$

El volumen total descargado desde un barco en un slot es igual a la suma de volúmenes descargados a cada tanque (36).

$$fb_{b,s} = \sum_q fbq_{b,q,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (36)$$

El volumen total cargado a un tanque durante un slot es igual a la sumatoria de volúmenes cargados de cada crudo (37).

$$fbq_{b,q,s} = \sum_c fcbq_{c,b,q,s} \quad \forall s \in S, b \in B, q \in Q \quad (37)$$

Las restricciones presentadas anteriormente tienen como objetivo establecer de manera precisa la relación existente entre las variables relativas a los volúmenes descargados desde los barcos y aquellas correspondientes a los volúmenes cargados en los tanques para evitar incongruencias al momento de emplearlas en restricciones posteriores, especialmente en los balances de inventario.

Se calcula el volumen descargado desde un barco mediante (38) y (39).

$$fb_{b,s} \leq \text{Caudal_max_}b_b * ddb_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (38)$$

$$fb_{b,s} \geq \text{Caudal_min_}b_b * ddb_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (39)$$

Se debe descargar el volumen total de crudo presente en cada barco a lo largo del horizonte (40).

$$\sum_s fcb_{c,b,s} = \text{Vol}_{b,c} \quad \forall c \in C, b \in B \quad (40)$$

Se calcula el volumen cargado a una unidad desde un tanque con las restricciones (41) y (42).

$$fqu_{q,u,s} \leq \text{Descarga_max_}q_q * ddqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (41)$$

$$fqu_{q,u,s} \geq \text{Descarga_min_}q_q * ddqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (42)$$

El volumen cargado desde un tanque es igual a la sumatoria de volúmenes cargados de cada crudo (43).

$$fqu_{q,u,s} = \sum_c fcpu_{c,q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, u \in U \quad (43)$$

El volumen total cargado en una unidad es igual a la sumatoria de los volúmenes provenientes de cada tanque (44).

$$fu_{u,s} = \sum_q fqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, u \in U \quad (44)$$

Se calcula el volumen de alimentación a cada unidad de destilación mediante (45) y (46).

$$fu_{u,s} \leq \text{Caudal_max_}u_u * ds_s \quad \forall s \in S, u \in U \quad (45)$$

$$fu_{u,s} \geq \text{Caudal_min_}u_u * ds_s \quad \forall s \in S, u \in U \quad (46)$$

Cumplimiento de especificaciones en las mezclas de alimentación a las unidades, restricciones (47) y (48).

$$\sum_q \sum_c fcpu_{c,q,u,s} * \text{Propiedad}_{c,k} \leq \text{Max_prop}_{u,k} * fu_{u,s} \quad \forall s \in S, k \in K, u \in U \quad (47)$$

$$\sum_q \sum_c fcpu_{c,q,u,s} * \text{Propiedad}_{c,k} \geq \text{Min_prop}_{u,k} * fu_{u,s} \quad \forall s \in S, k \in K, u \in U \quad (48)$$

Volumen de crudo c presente en cada tanque al inicio de cada slot excluido el primer slot (49).

$$\text{stock_}c_{q,c,s} = \text{stock_}c_{q,c,s-1} + \sum_b fcbq_{c,b,q,s-1} - \sum_u fcpu_{c,q,u,s-1} \quad \forall s \in S \setminus \{s_1\}, q \in Q, c \in C \quad (49)$$

Volumen de cada crudo presente en cada tanque al inicio del horizonte (50).

$$\text{stock_}c_{q,c,s} = \text{Stock0}_{q,c} \quad \forall q \in Q, c \in C, s = s_1 \quad (50)$$

Volumen de cada crudo presente en cada tanque al final de cada slot (51).

$$\text{stock_}c_{\text{end}}_{q,c,s} = \text{stock_}c_{q,c,s} + \sum_b fcbq_{c,b,q,s} - \sum_u fcpu_{c,q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, c \in C \quad (51)$$

Volumen total presente en cada tanque al inicio de cada slot, excluido el primero (52).

$$\text{stock}_{q,s} = \text{stock}_{q,s-1} + \sum_b fbq_{b,q,s-1} - \sum_u fqu_{q,u,s-1} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (52)$$

Volumen total presente en cada tanque al final de cada slot (53).

$$\text{stock_end}_{q,s} = \text{stock}_{q,s} + \sum_b fbq_{b,q,s} - \sum_u fqu_{q,u,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (53)$$

El volumen total en un tanque es igual a la sumatoria del volumen por crudo en ese mismo tanque, tanto al inicio (54) como al final de cada *slot* (55).

$$\text{stock}_{q,s} = \sum_c \text{stock}_{c,q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (54)$$

$$\text{stock}_{\text{end}}_{q,s} = \sum_c \text{stock}_{c,\text{end}}_{q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (55)$$

Volumen máximo y mínimo admitido en cada tanque al inicio de cada *slot* (56) y al final (57).

$$\text{Cap}_{\text{min}}_q \leq \text{stock}_{q,s} \leq \text{Cap}_{\text{max}}_q \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (56)$$

$$\text{Cap}_{\text{min}}_q \leq \text{stock}_{\text{end}}_{q,s} \leq \text{Cap}_{\text{max}}_q \quad \forall s \in S, q \in Q \quad (57)$$

En la restricción (58) se establece que para que un tanque pueda ser descargado después de recibir una carga, el tiempo transcurrido entre el final de la carga (fin de *slot* *s*) y el inicio de la descarga (inicio de *slot* *sbis*) debe ser mayor o igual a un determinado período de reposo.

$$is_{sbis} - ts_s \geq T_{\text{reposo}} * (x_{q,s} + y_{q,sbis} - 1) \quad \forall (s, sbis) \in S(s < sbis), q \in Q \quad (58)$$

La demanda de cada unidad a lo largo del horizonte puede cumplirse en forma exacta, por exceso o no cumplirse en su totalidad. A través de las restricciones (59) y (60) se calculan los niveles de sobreproducción y subproducción, respectivamente.

$$\text{sobreprod}_u \geq \sum_s fu_{u,s} - Dem_u \quad \forall u \in U \quad (59)$$

$$\text{subprod}_u \geq Dem_u - \sum_s fu_{u,s} \quad \forall u \in U \quad (60)$$

Las restricciones (61) y (62) permiten identificar si se producen cambios de tanques de alimentación para cada unidad entre períodos consecutivos.

$$co_{u,s} \geq y_{q,u,s} - y_{q,u,s+1} \quad \forall s, (s+1) \in S, q \in Q, u \in U \quad (61)$$

$$co_{u,s} \geq y_{q,u,s+1} - y_{q,u,s} \quad \forall s, (s+1) \in S, q \in Q, u \in U \quad (62)$$

Se aplica la técnica *big-M* para determinar que el inicio de la descarga de un barco debe coincidir con el inicio del *slot* durante el cual se lleva a cabo dicha tarea, (63) a (65). De manera similar se procede para determinar el final de la descarga (66) a (68).

$$t_{\text{inicio}}_{b,s} \leq is_s + H*(1 - xid_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (63)$$

$$t_{\text{inicio}}_{b,s} \geq is_s - H*(1 - xid_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (64)$$

$$t_{\text{inicio}}_{b,s} \leq H*xid_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (65)$$

$$t_{\text{partida}}_{b,s} \leq ts_s + H*(1 - xfd_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (66)$$

$$t_{\text{partida}}_{b,s} \geq ts_s - H*(1 - xfd_{b,s}) \quad \forall s \in S, b \in B \quad (67)$$

$$t_{\text{partida}}_{b,s} \leq H*xfd_{b,s} \quad \forall s \in S, b \in B \quad (68)$$

Se identifica, a lo largo del horizonte, el instante en el cual comienza (69) y finaliza (70) la descarga de un barco.

$$t_{\text{inicio}}_b = \sum_s t_{\text{inicio}}_{b,s} \quad \forall b \in B \quad (69)$$

$$t_{\text{partida}}_b = \sum_s t_{\text{partida}}_{b,s} \quad \forall b \in B \quad (70)$$

Un barco puede comenzar su descarga luego de arribar a la instalación (71).

$$t_{\text{inicio}}_b \geq T_{\text{arribo}}_b \quad \forall b \in B \quad (71)$$

Un barco debe comenzar su descarga antes de partir (72).

$$t_{\text{inicio}}_b \leq t_{\text{partida}}_b \quad \forall b \in B \quad (72)$$

Se calcula la tardanza como el tiempo transcurrido entre la fecha de fin de descarga y la de partida prevista (73).

$$\text{tardanza}_b \geq t_{\text{partida}}_b - \text{Partida}_{\text{esperada}}_b \quad \forall b \in B \quad (73)$$

Se calcula la espera como el tiempo transcurrido entre el arribo de un barco y el inicio de su descarga (74).

$$\text{espera}_b \geq t_{\text{inicio}}_b - T_{\text{arribo}}_b \quad \forall b \in B \quad (74)$$

La restricción (75) determina que la concentración de un determinado crudo en el caudal de salida de un tanque debe ser igual a la concentración de dicho crudo dentro del tanque. Notar que consiste en una restricción no lineal.

$$\text{stock}_{q,s} * fc_{q,c,u,s} = f_{q,c,u,s} * \text{stock}_{c,q,s} \quad \forall s \in S, q \in Q, c \in C, u \in U \quad (75)$$

3.4 Función objetivo

La función objetivo está dada por la ecuación (76) y tiene en cuenta el ingreso obtenido del procesamiento de crudos, los costos asociados al cambio en tanques

de alimentación, sobreproducción, subproducción, tardanza y espera de los barcos.

$$\begin{aligned}
 \max z = & \sum_s \sum_u \sum_q \sum_c fcqu_{c,q,u,s} * Ingresos_c \\
 & - Cco * \sum_s \sum_u co_{u,s} \\
 & - \sum_u Csobreprod_u * sobreprod_u \\
 & - \sum_u Csubprod_u * subprod_u \\
 & - \sum_b Cdemora_b * espera_b \\
 & - \sum_b Ctardanza_b * tardanza_b
 \end{aligned}
 \tag{76}$$

4 RESULTADOS

Se lleva a cabo la resolución de dos ejemplos. El primero consiste en un horizonte de planificación de 96 horas, una refinería con 8 tanques de almacenamiento, 2 unidades de destilación y 5 tipos de crudos. Además, se considera la llegada de 2 barcos, el primero a las 20 horas y el segundo a las 60 horas. La fecha de partida esperada es de sendas 25 horas posteriores a la llegada. La demanda en cada unidad de destilación es de 90.000 m³. El segundo ejemplo se plantea sobre un horizonte de planificación de 168 horas. Se considera la llegada de un barco adicional. Dicho tercer barco llega a las 100 horas y su partida esperada es a las 125 horas. La demanda en cada unidad es de 150.000 m³. Sin pérdida de generalidad, en los ejemplos presentados, se considera que la calidad de las mezclas se define a partir de una única propiedad cuya concentración se expresa en porcentaje en volumen. Resulta importante destacar que el modelo es escalable respecto a este punto y admite casos de estudio que contemplen un número mayor de propiedades.

Los valores de los parámetros se han tomado de ejemplos expuestos en los artículos citados.

Respecto al ejemplo 1, en la figura 2 se representan los niveles de inventario en cada tanque a lo largo del horizonte y en las figuras 3 y 4 se muestran los diagramas de Gantt de tanques y barcos, respectivamente. Luego, en las figuras 5, 6 y 7 se exhiben los mismos tipos de gráficos para los resultados del ejemplo 2.

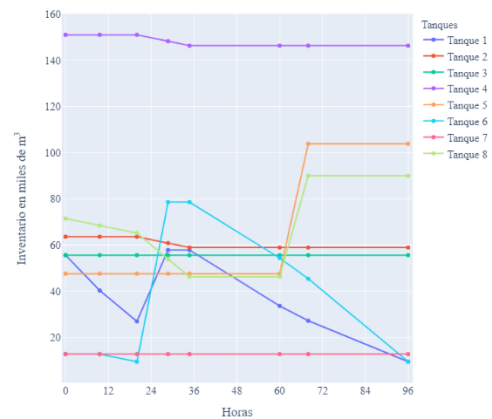


Figura 2: Nivel de inventario en tanques (ejemplo 1).

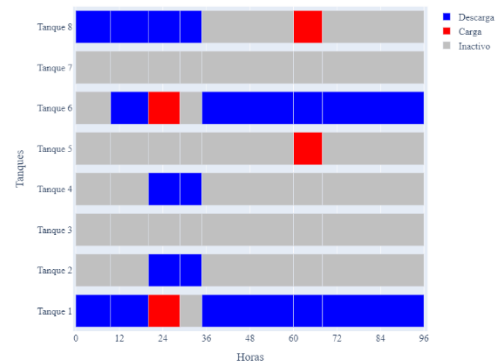


Figura 3: Diagrama de Gantt de tanques (ejemplo 1).

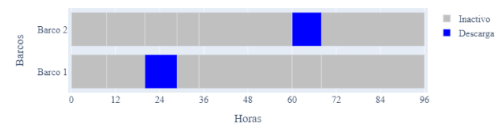


Figura 4: Diagrama de Gantt de barcos (ejemplo 1).

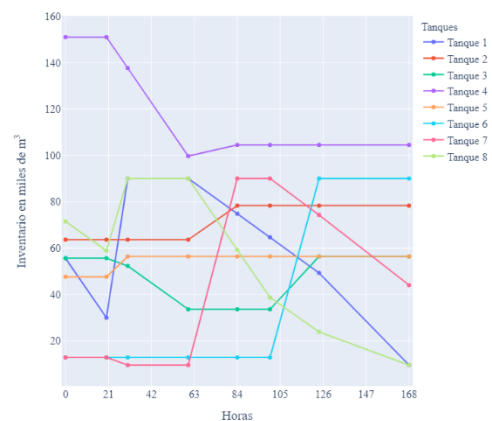


Figura 5: Nivel de inventario en tanques (ejemplo 2).

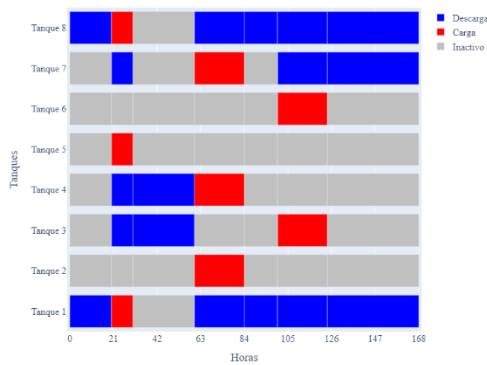


Figura 6: Diagrama de Gantt de tanques (ejemplo 2).

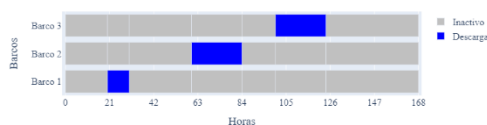


Figura 7: Diagrama de Gantt de barcos (ejemplo 2).

Ambos ejemplos fueron resueltos utilizando el *solver* *DICOPT* (*NLP solver: CONOPT 3, MILP solver: CPLEX*) dentro del *software* *GAMS 32.2.0* en un ordenador con procesador *Intel(R) Core(TM) i7-10510U 2.30 GHz* y *16 GB* de memoria *RAM*. El beneficio obtenido para el primer caso es de *1.582.817 €* y se ejecuta en *63 segundos*. El segundo ejemplo se ejecuta en *217 segundos* y el beneficio es de *3.178.465 €*.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se abordó el problema de programación de las operaciones llevadas a cabo en una refinería con acceso marítimo. A partir de los gráficos se observa el cumplimiento de las restricciones de operación tales como el transcurso de cierto período de reposo para un tanque que haya sido cargado o, no permitir simultáneamente la carga y descarga de un mismo tanque.

El modelo permite obtener rápidamente programas de producción factibles para un horizonte de planificación de hasta una semana (ejemplo 2). Aunque, debido a la no convexidad del mismo, no se puede garantizar un óptimo global.

Se han resuelto otros ejemplos además de los presentados en el trabajo y se observa que, al igual que en los casos anteriores, se obtienen soluciones en tiempos acotados.

El trabajo futuro se focalizará en implementar un enfoque estocástico el cual permita obtener soluciones más robustas. Se tiene interés en desarrollar un modelo de programación estocástica en dos etapas considerando incertidumbre en la llegada de barcos y

en la demanda de las unidades de destilación. Además, se tiene la intención de adaptar el modelo de manera que permita resolver redes más complejas que cuenten con más de un punto de amarre y oleoducto.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero brindado por la Agencia Estatal de Investigación a través del Subprograma Estatal de Formación del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+i, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020, cofinanciado por el Fondo Social Europeo, bajo el proyecto InCo4In (PGC 2018-099312-B-C31). También se agradece a la empresa Petróleos del Norte S.A.

English summary

CRUDE OIL OPERATIONS SCHEDULING IN A MARINE-ACCESS REFINERY

Abstract

This work focuses on the optimization of short-term crude oil operations scheduling in a system composed of a refinery and a maritime terminal within the middle segment of the oil industry supply chain.

The main challenge lies in coordinating the decisions made at both facilities and achieving a solution that is economically competitive.

Based on the aforementioned premise, this work presents a continuous-time mixed integer nonlinear programming (MINLP) formulation in order to support the decision-making process in an integral way.

Keywords: Mixed integer nonlinear programming; Continuous-time representation; Crude oil scheduling; Refinery; Marine terminal.

Referencias (10 ptos, negrita)

- [1] Cerdá, J., Pautasso, P. C., & Cafaro, D. C. (2015). Efficient Approach for Scheduling Crude Oil Operations in Marine-Access Refineries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(33), 8219–8238. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01461>
- [2] Furman, K. C., Jia, Z., & Ierapetritou, M. G. (2007). A Robust Event-Based Continuous Time Formulation for Tank Transfer Scheduling.

- Industrial & Engineering Chemistry Research, 46(26), 9126–9136. <https://doi.org/10.1021/ie061516f>
- [3] Gómez Palacín, C. (2020). Efficient scheduling of batch processes in continuous processing lines.
- [4] Gomez Palacin, C., Mendez, C. A., & De Prada, C. (2019). Slots Startup Synchronization with Shared Resources Dependency. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 1321-1326. <https://doi.org/10.3303/CET1974221>
- [5] Jia, Z., Ierapetritou, M., & Kelly, J. D. (2003). Refinery Short-Term Scheduling Using Continuous Time Formulation: Crude-Oil Operations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(13), 3085–3097. <https://doi.org/10.1021/ie020124f>
- [6] Lee, H., Pinto, J. M., Grossmann, I. E., & Park, S. (1996). Mixed-Integer Linear Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(5), 1630–1641. <https://doi.org/10.1021/ie950519h>
- [7] Pinto, J., Joly, M., & Moro, L. (2000). Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers & Chemical Engineering*, 24(9–10), 2259–2276. [https://doi.org/10.1016/s0098-1354\(00\)00571-8](https://doi.org/10.1016/s0098-1354(00)00571-8)
- [8] Reddy, P. P., Karimi, I., & Srinivasan, R. (2004). A new continuous-time formulation for scheduling crude oil operations. *Chemical Engineering Science*, 59(6), 1325–1341. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.01.009>
- [9] Winston, W. L., & Goldberg, J. B. (2004). *Operations research: Applications and algorithms*. Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole



© 2021 by the authors.
Submitted for possible
open access publication
under the terms and conditions of the Creative
Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-ncsa/4.0/deed.es>).

APENDICE DE SOPORTE**Nomenclatura:****Conjuntos**

- S = *slots* de tiempo.
- B = barcos.
- Q = tanques de almacenamiento.
- U = unidades de destilación de crudo.
- C = tipos de crudos.
- K = propiedades de crudos.

Parámetros

- H = longitud del horizonte de planeación (horas).
- $Tanques_barco$ = cantidad máxima de tanques que pueden ser cargados al mismo tiempo.
- $Cdus_tanque$ = cantidad máxima de unidades que puede alimentar un mismo tanque en forma simultánea.
- $Tanques_cdu$ = cantidad máxima de tanques que pueden alimentar, simultáneamente, a una misma unidad.
- $Carga_min_q_q$ = caudal mínimo de carga de un tanque.
- $Carga_max_q_q$ = caudal máximo de carga de un tanque.
- $Caudal_max_b_b$ = caudal máximo de descarga de un barco.
- $Caudal_min_b_b$ = caudal mínimo de descarga de un barco.
- $Descarga_max_q_q$ = caudal máximo de descarga de un tanque.
- $Descarga_min_q_q$ = caudal mínimo de descarga de un tanque.
- $Caudal_max_u_u$ = caudal máximo de carga de una unidad de destilación.
- $Caudal_min_u_u$ = caudal mínimo de carga de una unidad de destilación.
- $Propiedad_{c,k}$ = valor de la propiedad k para el crudo c .
- $Max_prop_{u,k}$ = valor máximo admitido de la propiedad k en el caudal de carga de la unidad u .
- $Min_prop_{u,k}$ = valor mínimo admitido de la propiedad k en el caudal de carga de la unidad u .
- Cap_max_q = máximo nivel de inventario admitido en tanque q .
- Cap_min_q = mínimo nivel de inventario admitido en tanque q .
- T_reposo = tiempo mínimo de reposo de un tanque desde que finaliza la carga del mismo.

- Dem_u = volumen total demandado por la unidad u a lo largo del horizonte.
- $Csobreprod_u$ = costo asociado a la unidad u por incurrir en sobreproducción a lo largo del horizonte.
- $Csubprod_u$ = costo asociado a la unidad u por incurrir en subproducción a lo largo del horizonte.
- $Ingresos_c$ = beneficio unitario obtenido del procesamiento del crudo c .
- Cco = costo por cambio en tanques de alimentación.
- T_arribo_b = período de llegada del barco b a la terminal.
- $Partida_esperada_b$ = período máximo en el que se espera que el barco b abandone la instalación.
- $Ctardanza_b$ = costo unitario de partida tardía del barco b .
- $Cdemora_b$ = costo unitario de espera en mar del barco b .
- $Vol_{b,c}$ = volumen de crudo c transportado por el barco b .
- $Stock0_{q,c}$ = inventario inicial de crudo c en el tanque q .

Variables reales positivas

- ts_s = indica el instante en el que termina el *slot* s .
- is_s = indica el instante en el que inicia el *slot* s .
- ds_s = duración del *slot* s .
- $ddb_{b,s}$ = duración de la descarga del barco b durante el *slot* s .
- $dcq_{q,s}$ = duración de la carga del tanque q durante el *slot* s .
- $ddq_{q,s}$ = duración de la descarga del tanque q durante el *slot* s .
- $diqu_{q,s}$ = duración del estado de inactividad del tanque q durante el *slot* s .
- $ddqu_{q,u,s}$ = duración de la descarga del tanque q a la unidad u durante el *slot* s .
- $ddbq_{b,q,s}$ = duración de la descarga del barco b al tanque q durante el *slot* s .
- $fcqb_{c,b,q,s}$ = volumen de crudo c descargado desde el barco b al tanque q durante el *slot* s .
- $fbq_{b,q,s}$ = volumen descargado desde el barco b al tanque q durante el *slot* s .
- $fc_{c,b,s}$ = volumen de crudo c descargado desde el barco b durante el *slot* s .
- $fb_{b,s}$ = volumen descargado desde el barco b durante el *slot* s .
- $fqu_{q,u,s}$ = volumen descargado desde el tanque q a la unidad u durante el *slot* s .

- $fc_{q,c,u,s}$ = volumen de crudo c descargado desde el tanque q a la unidad u durante el *slot* s .
- $fu_{u,s}$ = volumen cargado a la unidad de destilación u durante el *slot* s .
- $stock_{c,q,c,s}$ = nivel de inventario de crudo c en el tanque q al inicio del *slot* s .
- $stock_{q,s}$ = nivel de inventario en el tanque q al inicio del *slot* s .
- $stock_{end_{q,s}}$ = nivel de inventario en el tanque q al final del *slot* s .
- $stock_{c_{end_{q,c,s}}}$ = nivel de inventario de crudo c en el tanque q al final del *slot* s .
- $sobreprod_u$ = volumen excedente de producción respecto a la demanda de u .
- $subprod_u$ = volumen faltante de producción respecto a la demanda de u .
- t_{inicio_b} = fecha de inicio de descarga del barco b .
- $tinicio_{b,s}$ = variable auxiliar empleada en técnica de *big-M*.
- $t_{partida_b}$ = fecha de fin de descarga del barco b .
- $tpartida_{b,s}$ = variable auxiliar empleada en técnica de *big-M*.
- $tardanza_b$ = tiempo transcurrido en caso que el barco b finalice su descarga luego de la fecha de partida esperada.
- $espera_b$ = tiempo transcurrido entre el arribo de un barco y su fecha de inicio de descarga.
- $x_{q,s}$ = vale 1 si el tanque q se carga durante el *slot* s .
- $y_{q,u,s}$ = vale 1 si el tanque q alimenta a la unidad de destilación u durante el *slot* s .
- $y_{q,s}$ = vale 1 si el tanque q se descarga durante el *slot* s .
- $z_{q,s}$ = vale 1 si el tanque q se encuentra inactivo durante el *slot* s .
- $co_{u,s}$ = vale 1 si se modifican los tanques de alimentación de la unidad de procesamiento u entre dos *slots* consecutivos.

VARIABLES BINARIAS

- $x_{b,s}$ = vale 1 si el barco b se descarga durante el *slot* s .
- $xid_{b,s}$ = vale 1 si el barco b comienza su descarga al inicio del *slot* s .
- $xfd_{b,s}$ = vale 1 si el barco b finaliza su descarga al final del *slot* s .