DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE CUADRILLAS PARA LA INTERVENCIÓN DE POZOS DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS

Porporatto, Lucas

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral
Directora: Cafaro, Vanina.
Co-Director: Cafaro, Diego.

Área: Ingeniería

Palabras claves: Optimización, Modelado Matemático, Producción de Petróleo y Gas.

INTRODUCCIÓN

En la última década, la combinación de técnicas de perforación horizontal de pozos y fractura hidráulica de la roca madre han permitido acceder a grandes volúmenes de gas y petróleo, cuya explotación era inviable hasta hace unos años. Argentina por su parte, ha incrementado rápidamente su producción confirmando el potencial de su principal reservorio, Vaca Muerta, segunda reserva de gas y cuarta de petróleo no convencional en el mundo. La correcta planificación y programación de las operaciones e intervenciones de mantenimiento de los pozos de producción resulta de vital importancia para incrementar su vida útil, al mismo tiempo que permite hacer un uso eficiente de los recursos de producción.
El problema reviste una gran complejidad, tal como se muestra en el trabajo presentado por Achkar y colab. (2019). En él los autores formulan un modelo matemático mixto entero lineal (MILP) para generar una agenda óptima de operaciones de mantenimiento de pozos a cargo de diversas cuadrillas de trabajo que son contratadas anualmente. Los resultados ponen en evidencia que los costos de operación de las cuadrillas constituyen el factor más importante en el cálculo de los costos totales. Adicionalmente, se detectan tiempos ociosos considerables y existe un evidente desbalance en el uso de estos recursos, mayormente generado por un sobredimensionamiento injustificado de muchas de las cuadrillas contratadas. Con el objetivo de lograr una utilización más eficiente de los recursos, tendiente a minimizar los costos operativos, en el presente trabajo se propone un MILP extendido que permitirá dimensionar de antemano la estrategia de contratación de cuadrillas (tipo y cantidad), para atender eficientemente a la demanda de tareas de mantenimiento requeridas por los pozos de producción de petróleo y gas.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es desarrollar una formulación matemática mixta entera lineal de tiempo discreto que permita determinar el número óptimo de cuadrillas de trabajo de cada tipo que se deberían contratar para reducir los costos operativos asociados a las tareas de mantenimiento de pozos de petróleo y gas, cumpliendo con el plan de operaciones.

METODOLOGÍA

Se estudió el problema de programación óptima de operaciones asociadas a la intervención de pozos de producción de petróleo y gas. Fundamentalmente, se tomó como base el

Título del proyecto: PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES LOGÍSTICAS ASOCIADAS A LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO Y COMBUSTIBLES
Instrumento: CAI+D 2016 Tipo II Cod.50020150100097LI
Año convocatoria: 2019
Organismo financiador: Universidad Nacional del Litoral
Directora: Cafaro, Vanina

desarrollo de Achkar y colab. (2019). A partir de analizar las soluciones de dicho trabajo, surge la necesidad de generar un modelo matemático, en un nivel jerárquico superior (etapa de planeación), que permita determinar, previamente a la programación de operaciones, el dimensionamiento de las cuadrillas necesarias (tipo y cantidad) para atender a la demanda de las operaciones de mantenimiento proyectadas para un conjunto de pozos productivos. El resultado obtenido en la etapa de planeación, que surge de resolver el MILP propuesto, es validado resolviendo el modelo de programación de operaciones publicado por Achkar y colab. (2019), pero utilizando como dato de entrada el conjunto de cuadrillas óptimas determinado en la etapa de planeación. Se resuelven así dos casos de estudio para analizar el impacto que genera la solución propuesta en torno a los costos operativos que se desprenden de la agenda de operaciones.

Formulación matemática

El modelo matemático desarrollado posee dos conjuntos: cuadrillas (*J*) y tareas (*I*). Luego se crea el parámetro binario $R_{i,j}$, el cual toma valor 1 si la cuadrilla *j* está en condiciones de realizar la tarea *i*. Existen otros parámetros como: costo de uso por hora de cada cuadrilla (cu_j), horas diarias disponibles de cada cuadrilla (tc_j) y duración de la tarea en horas (dt_i). Además, el modelo se compone de variables continuas (no negativas) y binarias. Las principales variables binarias son Y_j y $W_{i,j}$; donde Y_j adopta valor 1 en caso de que la solución óptima sugiera contratar la cuadrilla *j*, y $W_{i,j}$ es igual a 1 si la cuadrilla *j* se asigna a la tarea *i*. En cualquier otro caso las variables binarias asumen valor nulo. Por su parte, las principales variables continuas positivas son: HT_j: total de horas de trabajo de la cuadrilla *j* a realizar a lo largo del horizonte de planificación actual, HTD_j: total de días del horizonte que se encuentra ocupada la cuadrilla *j*, CUC_j: costo de uso de la cuadrilla *j* y *MK*: día de finalización del programa de operaciones, también conocido como *makespan*.
A continuación, se explicitan las restricciones que modelan el problema. La restricción 1 determina que toda operación debe ser realizada por una única cuadrilla del conjunto de posibles. Por su parte las ecuaciones 2 y 3 definen, respectivamente, el cálculo del total de horas de trabajo a realizar por cada cuadrilla, y una estimación del total de días de labor. En la restricción 4, mediante el uso de un parámetro de tipo *big M,* se fuerza a que toda cuadrilla no contratada ($Y_j = 0$) no tenga carga de trabajo ($HT_j = 0$). La ecuación 5 calcula el *makespan* y finalmente la restricción 6 describe el cálculo del costo de uso de cada cuadrilla.

$$\sum_{j:R_{i,j=1}} W_{i,j} = 1 \qquad \forall\ i\ \in I \tag{1}$$

$$\sum_{i:R_{i,j=1}} W_{i,j}\, dt_i = HT_j \qquad \forall\ j\ \in J \tag{2}$$

$$HTD_j = \frac{HT_j}{tc_j} \qquad \forall\ j\ \in J \tag{3}$$

$$HT_j \leq Y_j\, M \qquad \forall\ j\ \in J \tag{4}$$

$$MK \geq HTD_j \qquad \forall\ j\ \in J \tag{5}$$

$$CUC_j = cu_j\, tc_j\, Y_j\, MK \qquad \forall\ j\ \in J \tag{6}$$

Se puede ver que en la ecuación 6 existe una multiplicación entre las variables Y_j (decisión de contratar a j) y MK (días de trabajo de todas las cuadrillas para cumplir con las operaciones), lo que genera un modelo no-lineal, no convexo. Para evitar este escenario no deseado, ya que la solución de modelos no convexos no da garantías de óptimo global, se procede a redefinir dicha ecuación en términos lineales, manteniendo así una formulación MILP.

Restricciones para la linealidad

Para salvar la no-linealidad de la ecuación 6, se propone obtener una única variable que vincule a las variables en conflicto: Y_j y MK. Para ello, se recurre a la discretización del horizonte de tiempo en intervalos fijos. En primer lugar, se añade al modelo el conjunto períodos de tiempo (T). Cada elemento de este conjunto representa un día y tiene asociado los parámetros c_t y f_t, correspondientes al momento en que inicia y finaliza cada día, respectivamente. Se agregan también dos variables binarias: S_t y $X_{j,t}$. S_t señala el período de tiempo en que terminan todas las tareas (para el cual se verifica $S_t = 1$), tal como muestran las ecuaciones 7 y 8. Mientras que $X_{j,t}$ permite reconocer el número de períodos de uso de cada cuadrilla, evitando la no-linealidad. Su valor se obtiene mediante las restricciones 9 y 10. De esta manera, $X_{j,t}$ toma valor 1 únicamente en caso de que la cuadrilla j sea contratada y el elemento de tiempo discreto t represente el fin de todas las tareas ($S_t = 1$). Así, a través de las restricciones 7 a 11, es posible el cálculo del costo de uso de cada cuadrilla de manera lineal, reemplazando la ecuación 6. En resumen, la formulación MILP a resolver se compone de las restricciones (1) a (5) y (7) a (11), minimizando los costos totales de uso de cuadrillas a través de la Función Objetivo (FO) detallada en la ecuación 12.

$$c_t\, S_t \leq MK \leq f_t\, S_t + \text{card(T)}\,(1 - S_t) \qquad \forall\, t \in T \tag{7}$$

$$\textstyle\sum_{t \in T} S_t = 1 \tag{8}$$

$$S_t + Y_j - 1 \leq X_{j,t} \leq S_t \qquad \forall\; j \in J, t \in T \tag{9}$$

$$X_{j,t} \leq Y_j \qquad \forall\; j \in J, t \in T \tag{10}$$

$$CUC_j = \textstyle\sum_{t \in T} t\, cu_j\, tc_j\, X_{j,t} \qquad \forall\, j \in J \tag{11}$$

$$Min\ Z = \textstyle\sum_{j \in J} CUC_j \tag{12}$$

Estrategia de implementación

Para extender el alcance del trabajo realizado, se decidió asimismo crear un algoritmo para integrar el MILP de planeación presentado más arriba junto al modelo de programación de operaciones propuesto por el mismo grupo. El algoritmo, descripto en la Figura 1, se nutre de la información de demanda proyectada para determinar la necesidad de cuadrillas a través del MILP propuesto. Una vez obtenido el conjunto estimado de cuadrillas necesario para afrontar el listado de operaciones, se resuelve el MILP de programación de operaciones, logrando soluciones con mayor nivel de detalle. A partir del análisis de estos resultados se utilizan técnicas propias de Ingeniería Industrial para el reconocimiento de los recursos cuello de botella, y se avanza en iteraciones de “descongestión” hasta no lograr beneficios.

Figura 1. Algoritmo para el problema integrado de planeación de cuadrillas y programación de tareas.

RESULTADOS

Para la validación de las soluciones obtenidas se resolvieron dos casos de estudio reales con complejidades diferentes publicados en la literatura. El análisis se centra fundamentalmente en el impacto que genera en los costos operativos un apropiado dimensionamiento de los recursos en la etapa de planeación. La Tabla 1 resume los costos de operación de las cuadrillas, el *makespan* y el número de cuadrillas utilizadas antes y después de la metodología propuesta. Los casos se resuelven utilizando GAMS como lenguaje de modelado algebraico en un procesador Intel(R) Core(TM) i5-9600K, 3.70GHz, 6 proc., 16,0 GB de RAM.

Tabla 1. Soluciones obtenidas para los casos de estudio analizados

Caso	**Metodología**	**Costo Total** [US$]	**Nº cuadrillas**	**MK** [h]
1	MILP de programación (Achkar y colab.)	208.455,88	36	57,5
	Algoritmo propuesto (Figura 1)	151.028,34	20	64
2	MILP de programación (Achkar y colab.)	216.497,00	32	226
	Algoritmo propuesto (Figura 1)	66.518,82	22	116

CONCLUSIONES

Con la metodología propuesta se logran obtener considerables ahorros en los costos operativos (29 % y 69 % en los casos 1 y 2, respectivamente), debido a la reducción significativa en el número de cuadrillas a contratar al realizar un correcto dimensionamiento antes de la etapa de programación. En efecto, es posible observar un mejor aprovechamiento del uso de los recursos en el tiempo, y en el caso 2 incluso se logra una reducción en el *makespan* del programa. Queda demostrado que la metodología propuesta es una herramienta útil y eficiente para abordar problemas integrados de planeación de recursos y programación de operaciones en pozos de petróleo y gas. Queda pendiente incorporar robustez al plan dado que, en general, el listado definitivo de operaciones a programar en cada ciclo no se conoce con total certeza al abordar el dimensionamiento de las dotaciones. Una misma dotación (solución del modelo de planeación) deberá ser capaz de dar buenas respuestas aún ante cambios en el conjunto de operaciones requeridas.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Achkar, V. G. y colab., (2019). *Discrete-time MILP formulation for the optimal scheduling of maintenance tasks on oil and gas production assets.* Ind. & Eng. Chem. Res., 58(19), 8231-8245.
Center, B. (2020). *Annual energy outlook 2020.* Energy Information Administration, Washington, DC.