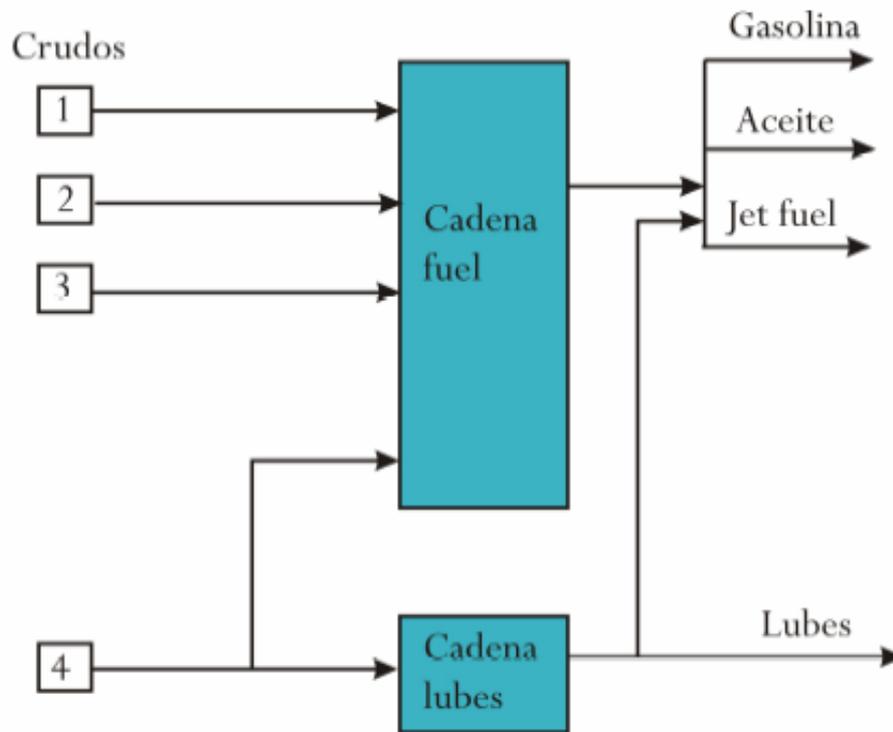


# PLANIFICACIÓN Y SCHEDULING DE UNA REFINERÍA



La figura anterior muestra un diagrama simplificado del blending de crudos y de la distribución de la producción de una refinería.

Se dispone de cuatro tipos de crudos diferentes (crudo 1, 2, 3 y 4) y cuatro familias de productos (gasolina, aceite, jet fuel y lubes). La refinería está separada en dos procesos, la cadena de fuel, a la cual entran los crudos 1, 2, 3 y parte del crudo 4 y en la que se obtienen gasolina, aceite y jet fuel, y la cadena de lubes (aceites industriales), en la que se introduce el crudo 4 restante y de la que se obtienen lubes y también el resto de productos.

Como datos para realizar la planificación de la refinería tenemos los rendimientos en cada producto de los diferentes crudos, la demanda máxima esperada de cada producto y los precios de venta de los mismos, los costes de compra de los crudos, los costes de operación y la cantidad disponible de cada crudo, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Datos de refinería**

	Rendimientos de productos (bbl/bbl crudo)					Valor del producto \$/bbl	Demanda máxima 10 <sup>3</sup> bbl/wk
	Crudos	Cadena de fuel			Cadena de lubes		
		1	2	3	4		
Productos							
Gasolina		0,6	0,5	0,3	0,4	45	170
Aceite		0,2	0,2	0,3	0,3	30	85
Jet fuel		0,1	0,2	0,3	0,2	15	85
Lube		0,0	0,0	0,0	0,0	60	20
Pérdidas operación		0,1	0,1	0,1	0,1	—	—
Coste crudo (\$/bbl)		15	15	15	25	25	
Costes operación (\$/bbl)		5	8,5	7,5	3	2,5	
Suministro de crudo disponible 10 <sup>3</sup> bbl/wk		100	100	100	200		

El **objetivo del proyecto** es distribuir los crudos de forma óptima entre los dos procesos (cadena de fuel y cadena de lubes), de forma que se maximice el beneficio.

## 1. Formulación del problema: función objetivo y modelo

La resolución del problema se va a realizar mediante optimización lineal y la herramienta *Solver* de *Excel*, para lo cual es necesario el desarrollo de un modelo en el que se identifiquen las variables a modificar, las restricciones y, por supuesto, la función objetivo.

### ➤ Variables

Las variables son los datos del problema que modificamos para conseguir optimizar la función objetivo.

En este caso, las variables que tomamos para maximizar el beneficio de la refinería son las cantidades de cada crudo que entran a cada proceso. Sabemos por el esquema de la refinería que los crudos 1, 2 y 3 sólo van a la cadena de fuel y que el crudo 4 se reparte entre la cadena de fuel y la de lubes. Así pues, tenemos la siguiente formulación de las variables:

$X_i \equiv$  cantidad de crudo tipo  $i$  (bbl/wk)

$i=1$ : crudo1

$i=2$ : crudo2

$i=3$ : crudo3

$i=4$ : crudo4

$i=5$ : crudo4 que va a cadena de fuel

$i=6$ : crudo4 que va a cadena de lubes

Teniendo en cuenta la relación:

$$X_4 = X_5 + X_6$$

Por lo cual, las variables que tomaremos para modificar y optimizar el problema son:  $X_1, X_2, X_3, X_5, X_6$ .

➤ Función objetivo

La función objetivo del problema es aquella que queremos optimizar, siendo función de las variables del problema.

En este caso la función objetivo es el beneficio, el cual queremos maximizar. El beneficio se puede expresar como ingresos menos gastos. Los ingresos los podemos obtener como el precio de venta de cada producto por la cantidad que obtenemos de cada uno de ellos. Los gastos son los costes de la compra de crudos y los costes de operación.

Para facilitar la formulación del problema, nos interesa expresar como variables las cantidades obtenidas de los diferentes productos a partir de los rendimientos de cada tipo de crudo en cada uno de ellos, subrayando que éstas no son las variables del problema de optimización.

$y_i$  ≡ cantidad de producto  $i$  (bbl/wk)

$y=1$ : gasolina

$y=2$ : aceite

$y=3$ : jet fuel

$y=4$ : lubes

$$y_1 = 0,6x_1 + 0,5x_2 + 0,3x_3 + 0,4x_5 + 0,4x_6$$

$$y_2 = 0,2x_1 + 0,2x_2 + 0,3x_3 + 0,3x_5 + 0,1x_6$$

$$y_3 = 0,1x_1 + 0,2x_2 + 0,3x_3 + 0,2x_5 + 0,2x_6$$

$$y_4 = 0,2x_6$$

Por cada barril de crudo procesado se pierden 0,1 barriles en la operación de transformación en productos. Esto se comprueba al sumar los rendimientos de cada tipo de crudo en los diferentes productos, resultando todos ellos 0,9. Por otra parte, al obtener los costes del proceso hay que multiplicar los diferentes costes por el barril completo de crudo, aunque no todo se transforme en productos, debido a las pérdidas del proceso.

Para hallar los gastos de la refinería sumamos los costes del crudo y los de operación y los multiplicamos por la cantidad de cada tipo de crudo. Para hallar los ingresos basta con multiplicar el precio de venta de cada barril de producto por la cantidad de cada producto que se obtiene en la refinería. Así, la función objetivo o beneficio resulta:

Máx f, siendo  $f \equiv I-G$  y estando expresada en \$/wk

$$I = [45y_1 + 30y_2 + 15y_3 + 60y_4]$$

$$G = [(15 + 5)x_1 + (15 + 8,5)x_2 + (15 + 7,5)x_3 + (25 + 3)x_5 + (25 + 2,5)x_6]$$

➤ Restricciones

Las restricciones del problema son aquellas limitaciones que se imponen a algunos valores del problema, ya sean a las variables del problema de optimización o a otros datos empleados en la formulación del problema.

En este caso las restricciones de problema son el suministro de cada tipo de crudo disponible, la demanda máxima de cada producto y la no negatividad de las variables del problema de optimización:

$$\begin{array}{lll} x_1 \leq 100000 & y_1 \leq 170000 & x_1 \geq 0 \\ x_2 \leq 100000 & y_2 \leq 85000 & x_2 \geq 0 \\ x_3 \leq 100000 & y_3 \leq 85000 & x_3 \geq 0 \\ x_4 \leq 200000 & y_4 \leq 20000 & x_5 \geq 0; x_6 \geq 0 \end{array}$$

## 2. Resolución del problema mediante programación lineal

La planificación de la refinería mediante optimización lineal se ha realizado con el programa *Excel* y su herramienta *Solver*, implementando el modelo desarrollado en el apartado anterior.

A continuación se incluye la hoja de Excel activa con la resolución del problema (hoja 1):

**PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN  
PLANIFICACIÓN Y SCHEDULING DE UNA REFINERÍA**      **PARALIZACIÓN**

Cantidades de crudos (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3
100000	100000	100000

Suministro de crudo disponible (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3
100000	100000	100000

A continuación se muestran tanto el planteamiento del problema en *Excel* como la solución obtenida con el *Solver*:

## PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN: PLANIFICACIÓN Y SCHEDULING DE UNA REFINERÍA

Cantidades de crudos (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO4fuel	CRUDO 4lub
100000	100000	66666,6667	0	100000

100000 CRUDO4total

FUNCIÓN OBJETIVO:

Maximizar el beneficio

3400000

Suministro de crudo disponible (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO4total
100000	100000	100000	200000

Rendimientos de los productos según el tipo de crudo (bbl/bbl crudo):

	Crudo 1	Crudo 2	Crudo 3	Crudo 4fuel	Crudo4lubes
Gasolina	0,6	0,5	0,3	0,4	0,4
Aceite	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1
Jet Fuel	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
Lube	0	0	0	0	0,2
Pérdidas	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Cantidad (bbl/wk):	Demanda máx(bbl/wk)	Precio (\$/bbl)	Ingresos (\$)
170000	170000	45	7650000
70000	85000	30	2100000
70000	85000	15	1050000
20000	20000	60	1200000
I.Total(\$)			12000000

Costes (\$/bbl):

	Crudo 1	Crudo 2	Crudo 3	Crudo 4fuel	Crudo4lubes
Costecrudo	15	15	15	25	25
Coste oper.	5	8,5	7,5	3	2,5
Total	20	23,5	22,5	28	27,5

 Función objetivo  
 Variables  
 Restricciones

Costes (\$):

2000000	2350000	1500000	0	2750000
---------	---------	---------	---	---------

C.totales(\$)  
8600000

Así pues, la solución que se obtiene para el problema de optimización lineal de planificación de la refinería es la siguiente:

Crudo 1: 100000 bbl/wk (cadena fuel)  
Crudo 2: 100000 bbl/wk (cadena fuel)  
Crudo 3: 66666,667 bbl/wk (cadena fuel)  
Crudo 4 a cadena de fuel: 0 bbl/wk  
Crudo 4 a cadena de lubes: 100000 bbl/wk  
Crudo 4 total: 100000 bbl/wk  
Beneficio: 3400000 \$/wk

### 3. Análisis de los resultados obtenidos y las restricciones activas en el óptimo

Según los resultados obtenidos mediante la herramienta *Solver* y respetando las restricciones impuestas al problema, el beneficio máximo posible es 3400000 \$/wk. Para resolver el problema se ha dado un valor inicial a las variables a modificar, es decir, a las cantidades de cada crudo introducidos en los dos procesos: 75000 bbl/wk de crudo 1, 75000 bbl/wk de crudo 2, 75000 bbl/wk de crudo 3, 80000 bbl/wk de crudo 4 a la cadena de fuel y 80000 bbl/wk a la cadena de lubes.

Una vez resuelto el problema, se necesitan 100000 bbl/wk del crudo 1, 100000 bbl/wk del crudo 2 y 66666,667 bbl/wk del crudo 3 a la cadena de fuel, no introduciendo nada de crudo 4 a este proceso. A la cadena de lubes es necesario introducir 100000 bbl/wk de crudo 4. Así, se obtienen 170000 bbl/wk de gasolina, 70000 bbl/wk de aceites, 70000 bbl/wk de jet fuel y 20000 bbl/wk.

Con esta planificación, en la refinería se tienen unos ingresos de 12000000 \$/wk y unos costes de 8600000 \$/wk, lo que da lugar al beneficio señalado.

Las restricciones activas en el óptimo son aquellas restricciones que se convierten en igualdades y que no dejan margen de variación o divergencia a las variables. En este caso como restricciones activas tenemos la cantidad de crudo 1 a la cadena de fuel (100000 bbl/wk), la cantidad de crudo 2 a la cadena de fuel (100000 bbl/wk), la cantidad de gasolina producida (170000 bbl/wk) y la cantidad de lubes producidas (20000 bbl/wk).

Al mismo tiempo que se ha resuelto el problema se han obtenido una serie de informes:

- Informe de respuestas

Las restricciones activas se muestran con divergencia igual a cero

Microsoft Excel 10.0 Informe de respuestas  
 Hoja de cálculo: [Proyecto.xls]Hoja1  
 Informe creado: 02/05/2006 23:59:08

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$M\$7		2865000	3400000

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$D\$7	CRUDO 1	75000	100000
\$E\$7	CRUDO 2	75000	100000
\$F\$7	CRUDO 3	75000	66666,66667
\$G\$7	CRUDO 4fuel	80000	0
\$H\$7	CRUDO 4lub	80000	100000

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$J\$22	Lube Cantidad (bbl/wk):	20000	\$J\$22<=\$L\$22	Obligatorio	0
\$G\$9	CRUDO 4fuel	100000	\$G\$9<=\$G\$14	Opcional	100000
\$J\$19	Gasolina Cantidad (bbl/wk):	170000	\$J\$19<=\$L\$19	Obligatorio	0
\$J\$20	Aceite Cantidad (bbl/wk):	70000	\$J\$20<=\$L\$20	Opcional	15000
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	70000	\$J\$21<=\$L\$21	Opcional	15000
\$D\$7	CRUDO 1	100000	\$D\$7<=\$D\$14	Obligatorio	0
\$F\$7	CRUDO 3	66666,66667	\$F\$7<=\$F\$14	Opcional	33333,33333
\$E\$7	CRUDO 2	100000	\$E\$7<=\$E\$14	Obligatorio	0

- Informe de límites

Microsoft Excel 10.0 Informe de límites  
 Hoja de cálculo: [Proyecto.xls]Informe de limites 1  
 Informe creado: 02/05/2006 23:59:08

Celda objetivo		
Celda	Nombre	Igual
\$M\$7		3400000

Celdas cambiantes		
Celda	Nombre	Igual
\$D\$7	CRUDO 1	100000
\$E\$7	CRUDO 2	100000
\$F\$7	CRUDO 3	66666,66667
\$G\$7	CRUDO 4fuel	0
\$H\$7	CRUDO 4lub	100000

Límite inferior	Celda objetivo
0	1950000
0	2600000
0	3100000
#N/A	#N/A
0	2550000

Límite superior	Celda objetivo
100000	3400000
100000	3400000
66666,66667	3400000
#N/A	#N/A
99999,96615	3399999,712

- Informe de sensibilidad

Microsoft Excel 10.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [Proyecto.xls]Hoja1

Informe creado: 02/05/2006 23:59:08

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coefficiente objetivo	Aumento permisible
\$D\$7	CRUDO 1	100000	5,5	14,5	1E+30
\$E\$7	CRUDO 2	100000	0,5	8	1E+30
\$F\$7	CRUDO 3	66666,66667	0	4,5	0,3
\$G\$7	CRUDO 4fuel	0	-4	2	4
\$H\$7	CRUDO 4lub	100000	0	8,5	1E+30

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible
\$J\$22	Lube Cantidad (bbl/wk):	20000	12,5	20000	10000
\$G\$9	CRUDO 4fuel	100000	0	200000	1E+30
\$J\$19	Gasolina Cantidad (bbl/wk):	170000	15	170000	10000
\$J\$20	Aceite Cantidad (bbl/wk):	70000	0	85000	1E+30
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	70000	0	85000	1E+30

## 5. Efecto de bajar la demanda máxima de ventas de jet fuel de 85 a 75 miles de barriles por semana

Si bajamos la demanda máxima de jet fuel a 75000 bbl/wk, al disminuir la región factible de soluciones, el óptimo sólo puede empeorar o mantenerse en el mismo valor. La solución óptima obtenida mediante el *Solver* es la misma que la que se obtenía en el caso base en el que la demanda máxima de jet fuel se situaba en 85000 bbl/wk, ya que con los valores óptimos de las variables para conseguir el máximo beneficio se obtenía una producción de jet fuel de 70000 bbl/wk, es decir, por debajo de los dos valores dados para la demanda de fuel.

Al no ser la demanda máxima de fuel una restricción activa en el óptimo del caso base y no ser superior la producción de jet fuel obtenida en este caso al nuevo valor impuesto para la demanda máxima, la solución óptima del nuevo problema es la misma que la de caso base, ya que el beneficio sigue siendo máximo y se siguen cumpliendo las restricciones.

Esto también se refleja en el informe de sensibilidad que se obtiene para el caso base. Al no ser la cantidad de jet fuel una restricción activa, el precio sombra es nulo, ya que una variación en la demanda máxima de este producto (valor límite o lado derecho de dicha restricción) no influye en el valor del óptimo.

### Microsoft Excel 10.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [Proyecto.xls]Hoja1

Informe creado: 02/05/2006 23:59:08

#### Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible
\$D\$7	CRUDO 1	100000	5,5	14,5	1E+30
\$E\$7	CRUDO 2	100000	0,5	8	1E+30
\$F\$7	CRUDO 3	66666,66667	0	4,5	0,3
\$G\$7	CRUDO 4fuel	0	-4	2	4
\$H\$7	CRUDO 4lub	100000	0	8,5	1E+30

#### Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible
\$J\$22	Lube Cantidad (bbl/wk):	20000	12,5	20000	10000
\$G\$9	CRUDO 4fuel	100000	0	200000	1E+30
\$J\$19	Gasolina Cantidad (bbl/wk):	170000	15	170000	10000
\$J\$20	Aceite Cantidad (bbl/wk):	70000	0	85000	1E+30
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	70000	0	85000	1E+30

## 7. Estudio de la conveniencia o no de seguir operando la planta de lubes en la refinería

Para estudiar si conviene seguir operando la planta de lubes en la refinería, vamos a comparar el beneficio máximo posible obtenido para el caso base y el que se obtiene manteniendo nula la entrada de crudo 4 en la cadena de lubes (paralización de dicha planta) e introduciendo todo el crudo 4 a la planta de lubes.

Si se obtiene un beneficio máximo mayor sin la operación de la cadena de lubes, se recomendará el cierre de esa planta en la refinería. En el caso contrario en el cual se obtenga un beneficio máximo mayor con la operación de la planta de lubes, se recomendará su continuidad.

Para el caso de paralización de la planta de lubes (ver hoja 1(5) de la hoja activa de Excel del segundo apartado) se obtiene el siguiente informe de respuestas:

Microsoft Excel 10.0 Informe de respuestas  
 Hoja de cálculo: [Proyecto3.xls]Hoja1 (5)  
 Informe creado: 05/05/2006 0:54:05

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$M\$7		2225000	2800000

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$D\$7	CRUDO 1	75000	100000
\$E\$7	CRUDO 2	75000	100000
\$F\$7	CRUDO 3	75000	100000
\$G\$7	CRUDO 4fuel	100000	50000

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$9	CRUDO 4fuel	50000	\$G\$9<=\$G\$14	Opcional	150000
\$J\$19	Gasolina Cantidad (bbl/wk):	160000	\$J\$19<=\$L\$19	Opcional	10000
\$J\$20	Aceite Cantidad (bbl/wk):	85000	\$J\$20<=\$L\$20	Obligatorio	0
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	70000	\$J\$21<=\$L\$21	Opcional	15000
\$D\$7	CRUDO 1	100000	\$D\$7<=\$D\$14	Obligatorio	0
\$E\$7	CRUDO 2	100000	\$E\$7<=\$E\$14	Obligatorio	0
\$F\$7	CRUDO 3	100000	\$F\$7<=\$F\$14	Obligatorio	0

Como se puede observar, ahora las variables del problema son las cantidades de crudo 1, 2, 3 y 4 alimentados a la cadena de fuel. La restricción de la cantidad de lubes producidas desaparece del planteamiento del problema. En este caso, las restricciones activas en el óptimo son la cantidad de crudo 1, 2 y 3 que se introducen en la cadena de fuel y la cantidad de aceite producido.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

## PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN: PLANIFICACIÓN Y SCHEDULING DE UNA REFINERÍA

Cantidades de crudos (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO4fuel	CRUDO 4lub
100000	100000	100000	50000	0

50000	CRUDO4total
-------	-------------

FUNCIÓN OBJETIVO:

Maximizar el beneficio

2800000

Suministro de crudo disponible (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO4total
100000	100000	100000	200000

Rendimientos de los productos según el tipo de crudo (bbl/bbl crudo):

	Crudo 1	Crudo 2	Crudo 3	Crudo 4fuel	Crudo4lubes
Gasolina	0,6	0,5	0,3	0,4	0,4
Aceite	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1
Jet Fuel	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
Lube	0	0	0	0	0,2
Pérdidas	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Cantidad (bbl/wk):	Demanda máx(bbl/wk)	Precio (\$/bbl)	Ingresos (\$)
160000	170000	45	7200000
85000	85000	30	2550000
70000	85000	15	1050000
0	20000	60	0
I.Total(\$)			10800000

Costes (\$/bbl):

	Crudo 1	Crudo 2	Crudo 3	Crudo 4fuel	Crudo4lubes
Costecrudo	15	15	15	25	25
Coste oper.	5	8,5	7,5	3	2,5
Total	20	23,5	22,5	28	27,5

	Función objetivo
	Variables
	Restricciones

Costes (\$):

2000000	2350000	2250000	1400000	0
---------	---------	---------	---------	---

C.totales(\$)

8000000

Así pues, para la operación de la refinería sin la planta de lubes se obtiene la solución siguiente:

Crudo 1: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 2: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 3: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 4 a cadena de fuel: 50000 bbl/wk
Crudo 4 a cadena de lubes: 0 bbl/wk
Crudo 4 total: 50000 bbl/wk
Beneficio: 2800000 \$/wk

Si comparamos con los resultados obtenidos para el caso base con operación de la cadena de lubes:

- Con cadena de lubes:
  - Ingresos: 12000000
  - Costes: 8600000
  - Beneficio: **3400000**
- Sin cadena de lubes:
  - Ingresos: 10800000
  - Costes: 8000000
  - Beneficio: **2800000**

Así pues, podemos recomendar la continuación de la cadena de lubes en la refinería, ya que en la solución óptima para su planificación obtenemos un beneficio mayor con una diferencia de 600000 €/wk.