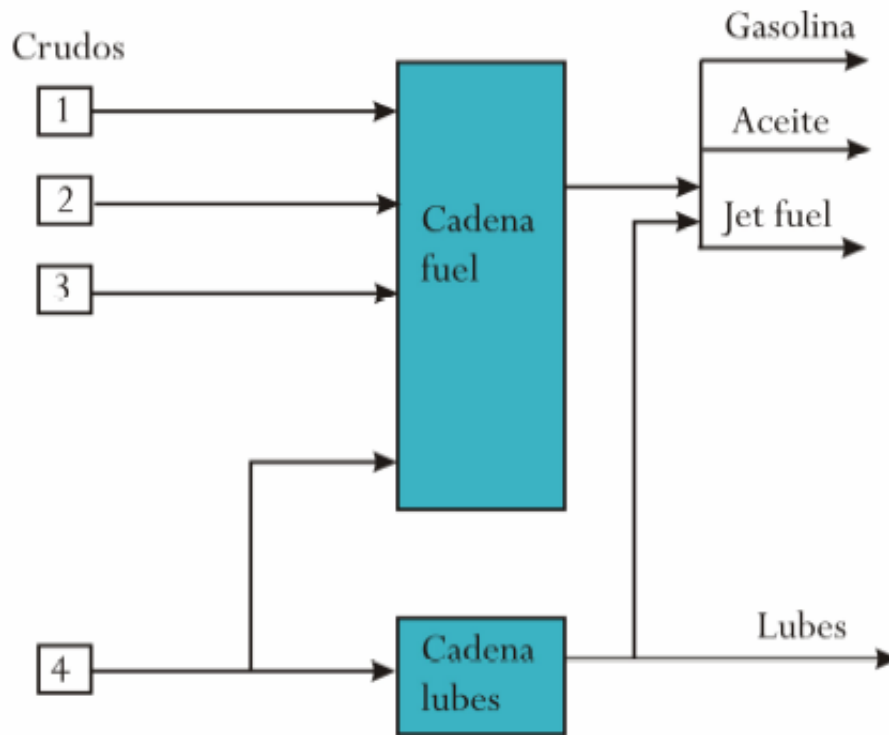


PLANIFICACIÓN Y SCHEDULING DE UNA REFINERÍA

1. Formulación del problema: función objetivo y modelo.....	5
2. Resolución del problema mediante programación lineal...	7
3. Análisis de los resultados obtenidos y las restricciones activas en el óptimo	9
4. Análisis del conjunto activo en el óptimo si el precio del crudo tipo 2 aumenta a 15,55\$.	11
5. Efecto de bajar la demanda máxima de ventas de jet fuel de 85 a 75 miles de barriles por semana	14
6. Efecto sobre el óptimo de la bajada de la cantidad disponible de crudo 1 a 75000 bbl/wk	18
7. Estudio de la conveniencia o no de seguir operando la planta de lubes en la refinería	21

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 ³ bbl/wk
	Cadena de fuel				Cadena de lubes		
	Crudos	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 ³ 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.

$y_i \equiv$ cantidad de producto i (bbl/wk)

$y=1$: gasolina
 $y=2$: aceite
 $y=3$: jet fuel
 $y=4$: lubes

$$\begin{aligned} y_1 &= 0,6x_1 + 0,5x_2 + 0,3x_3 + 0,4x_5 + 0,4x_6 \\ y_2 &= 0,2x_1 + 0,2x_2 + 0,3x_3 + 0,3x_5 + 0,1x_6 \\ y_3 &= 0,1x_1 + 0,2x_2 + 0,3x_3 + 0,2x_5 + 0,2x_6 \\ y_4 &= 0,2x_6 \end{aligned}$$

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):

170000
70000
70000
20000

Demanda
máx(bbl/wk)

170000
85000
85000
20000

Precio (\$/bbl)

45
30
15
60

Ingresos (\$)

7650000
2100000
1050000
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

4. Análisis del conjunto activo en el óptimo si el precio del crudo tipo 2 aumenta a 15,55\$.

Si cambia el precio del crudo 2, al resolver el problema de optimización lineal con *Solver* varía la solución dada para la planificación de la refinería, obteniéndose un beneficio de 3346000 \$/wk.

La hoja activa de *Excel* es la hoja 1(2) del libro activo insertado en el apartado 2.

Como resultado para maximizar el beneficio se obtiene:

Crudo 1: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
 Crudo 2: 80000 bbl/wk (cadena fuel)
 Crudo 3: 100000 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: 3346000 \$/wk

PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN: PLANIFICACIÓN Y SCHEDULING DE UNA REFINERÍA

Cantidades de crudos (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO4fuel	CRUDO 4lub
100000	80000	100000	0	100000

100000 CRUDO4total

FUNCIÓN OBJETIVO:

Maximizar el beneficio

3346000

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):

170000
76000
76000
20000

Demanda
máx(bbl/wk)

170000
85000
85000
20000

Precio (\$/bbl)

45
30
15
60

Ingresos (\$)

7650000
2280000
1140000
1200000

I.Total(\$)

12270000

Costes (\$/bbl):

	Crudo 1	Crudo 2	Crudo 3	Crudo 4fuel	Crudo4lubes
Costecrudo	15	15,55	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	1924000	2250000	0	2750000
---------	---------	---------	---	---------

C.totales(\$)

8924000

- Informe de respuestas

Microsoft Excel 10.0 Informe de respuestas
 Hoja de cálculo: [Proyecto.xls]Hoja1 (2)
 Informe creado: 03/05/2006 0:00:50

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$M\$7		3345000	3346000

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$D\$7	CRUDO 1	100000	100000
\$E\$7	CRUDO 2	100000	80000
\$F\$7	CRUDO 3	66666,66667	100000
\$G\$7	CRUDO 4fuel	0	0
\$H\$7	CRUDO 4lub	100000	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):	76000	\$J\$20<=\$L\$20	Opcional	9000
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	76000	\$J\$21<=\$L\$21	Opcional	9000
\$D\$7	CRUDO 1	100000	\$D\$7<=\$D\$14	Obligatorio	0
\$F\$7	CRUDO 3	100000	\$F\$7<=\$F\$14	Obligatorio	-0
\$E\$7	CRUDO 2	80000	\$E\$7<=\$E\$14	Opcional	20000

Como se puede observar en los resultados y en el informe de respuestas, al variar el coste del crudo 2 varían los valores de las variables en el óptimo y también las restricciones activas en éste, ya que en este caso las variables activas son la cantidad de crudo 1 (100000 bbl/wk), la cantidad de crudo 3 (100000 bbl/wk), la cantidad de gasolina producida (170000 bbl/wk) y la cantidad de lube producida (20000 bbl/wk).

Así pues, para esta solución se obtienen unos ingresos de 12270000 \$/wk y unos costes de 8924000 \$/wk, lo que proporciona un beneficio de 3346000 \$/wk, que es el máximo posible con las restricciones aplicadas.

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

Para ver el efecto sobre el óptimo de una disminución de la demanda máxima de jet fuel, vamos a reducirla a **65000 bbl/wk**. Para este caso, al resolver con el *Solver* (ver hoja 1(6) de la hoja activa de Excel del segundo apartado) se obtiene la solución siguiente:

Crudo 1: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 2: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 3: 50000 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: 3325000 \$/wk

Como se puede ver en la solución obtenida, el efecto de bajar la demanda máxima de fuel jet es la disminución del beneficio obtenido. Este resultado es lógico, ya que se ha reducido la región de soluciones posibles. También causa la disminución de la entrada de crudo 3 a la cadena de fuel, ya que eso permite reducir la producción de jet fuel por debajo de la demanda máxima, a la vez que se reduce también la producción de gasolina y aceite.

La nueva solución hace que cambien las restricciones activas en el óptimo, ya que ahora se obtienen como tales la cantidad de crudo 1 (100000 bbl/wk), la cantidad de crudo 2 (100000 bbl/wk), la cantidad de jet fuel producida (65000 bbl/wk) y la cantidad de lubes producida (20000 bbl/wk).

Las restricciones activas en el óptimo se pueden observar en el informe de respuestas que se muestra a continuación y se caracterizan por tener divergencia posible nula.

Al pasar la cantidad de jet fuel a ser una restricción activa, su precio sombra deja de ser nulo, como se puede apreciar en el informe de sensibilidad. El precio sombra nos da la variación que se produce en la función objetivo al variar una unidad el valor límite de la restricción. Este precio sombra tiene un rango de validez dentro del cual la función objetivo mejora o empeora según el sentido de la variación (aumento o disminución del valor límite de la restricción respectivamente para este caso). Al igual que para la función objetivo, en este intervalo el valor de las variables básicas del problema de optimización lineal también se ve modificado, pero no cambian las variables que integran en conjunto de variables básicas. En este caso el precio sombra es 15. Si aumentamos la producción en 5000 unidades para igualar la producción de la solución del caso base, comprobamos que se obtiene el beneficio obtenido para dicho caso:

$$3325000\$ + 15\$ \cdot 5000 = 3400000\$$$

- Informe de respuestas

Microsoft Excel 10.0 Informe de respuestas
 Hoja de cálculo: [Proyecto3.xls]Hoja1 (6)
 Informe creado: 04/05/2006 23:46:33

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$M\$7		2865000	3325000

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	50000
\$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):	165000	\$J\$19<=\$L\$19	Opcional	5000
\$J\$20	Aceite Cantidad (bbl/wk):	65000	\$J\$20<=\$L\$20	Opcional	20000
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	65000	\$J\$21<=\$L\$21	Obligatorio	0
\$D\$7	CRUDO 1	100000	\$D\$7<=\$D\$14	Obligatorio	0
\$F\$7	CRUDO 3	50000	\$F\$7<=\$F\$14	Opcional	50000
\$E\$7	CRUDO 2	100000	\$E\$7<=\$E\$14	Obligatorio	0

- Informe de sensibilidad

Microsoft Excel 10.0 Informe de sensibilidad
 Hoja de cálculo: [Proyecto3.xls]Hoja1 (6)
 Informe creado: 22/05/2006 0:25:58

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coefficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$D\$7	CRUDO 1	100000	13	14,5	1E+30	13
\$E\$7	CRUDO 2	100000	5	8	1E+30	5
\$F\$7	CRUDO 3	50000	0	4,5	7,5	1,5
\$G\$7	CRUDO 4fuel	0	-1	2	1	1E+30
\$H\$7	CRUDO 4lub	100000	0	8,5	1E+30	5,5

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$J\$22	Lube Cantidad (bbl/wk):	20000	27,5	20000	5000	15000
\$G\$9	CRUDO 4fuel	100000	0	200000	1E+30	100000
\$J\$19	Gasolina Cantidad (bbl/wk):	165000	0	170000	1E+30	5000
\$J\$20	Aceite Cantidad (bbl/wk):	65000	0	85000	1E+30	20000
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	65000	15	65000	5000	15000

Este precio sombra es válido en el intervalo: 60000<Jet fuel<80000

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	50000	0	100000
				100000 CRUDO4total

FUNCIÓN OBJETIVO:

Maximizar el beneficio

3325000

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):

165000
65000
65000
20000

Demanda
máx(bbl/wk)

170000
85000
65000
20000

Precio (\$/bbl)

45
30
15
60

Ingresos (\$)

7425000
1950000
975000
1200000

I.Total(\$)

11550000

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	1125000	0	2750000
---------	---------	---------	---	---------

C.totales(\$)

8225000

6. Efecto sobre el óptimo de la bajada de la cantidad disponible de crudo 1 a 75000 bbl/wk

Al reducir el campo de soluciones, según el análisis cualitativo, el valor óptimo de la función objetivo se mantendrá igual o empeorará. La resolución de este problema mediante Solver proporciona la siguiente solución (ver la hoja 1(4) de la hoja activa de Excel del apartado 2):

Crudo 1: 75000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 2: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 3: 100000 bbl/wk (cadena fuel)
Crudo 4 a cadena de fuel: 12500 bbl/wk
Crudo 4 a cadena de lubes: 100000 bbl/wk
Crudo 4 total: 112500 bbl/wk
Beneficio: 3212500 \$/wk

Es decir, disminuye la cantidad de crudo 1 a la cadena de fuel a 75000 bbl/wk, manteniéndose la cantidad de crudo 1 como restricción activa pero en su nuevo límite de 75000. La cantidad de crudo 2 y de crudo 4 a la cadena de lubes se mantienen constantes con respecto a la solución del caso base, pero lo que cambia significativamente en este caso es que la cantidad de crudo 4 alimentado a la cadena de lubes deja de ser nula para pasar a ser 12500 bbl/wk.

Se observa que el beneficio disminuye al hacerlo cantidad disponible de crudo 1. Esta tendencia es lógica, ya que el coeficiente de la función objetivo que multiplica a dicha cantidad es 14,5 (la función objetivo en el óptimo tiene todos los coeficientes positivos), por lo que si disminuye el beneficio también lo hará.

En este caso, se tiene una restricción activa más que en la solución del caso base. Además de la cantidad de crudo 1, la cantidad de crudo 2 y las cantidades de gasolina y lubes producidas, se añade a la lista de restricciones activas la cantidad de crudo 3 a la cadena de lubes (100000 bbl/wk). Esto se puede ver en el informe de respuestas que se muestra a continuación:

- Informe de respuestas

Microsoft Excel 10.0 Informe de respuestas
 Hoja de cálculo: [Proyecto3.xls]Hoja1 (4)
 Informe creado: 05/05/2006 0:25:18

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$M\$7		2502500	3212500

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$D\$7	CRUDO 1	50000	75000
\$E\$7	CRUDO 2	75000	100000
\$F\$7	CRUDO 3	75000	100000
\$G\$7	CRUDO 4fuel	80000	12500
\$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	<u>0</u>
\$G\$9	CRUDO 4fuel	112500	\$G\$9<=\$G\$14	Opcional	<u>87500</u>
\$J\$19	Gasolina Cantidad (bbl/wk):	170000	\$J\$19<=\$L\$19	Obligatorio	<u>0</u>
\$J\$20	Aceite Cantidad (bbl/wk):	78750	\$J\$20<=\$L\$20	Opcional	<u>6250</u>
\$J\$21	Jet Fuel Cantidad (bbl/wk):	80000	\$J\$21<=\$L\$21	Opcional	<u>5000</u>
\$D\$7	CRUDO 1	75000	\$D\$7<=\$D\$14	Obligatorio	<u>0</u>
\$F\$7	CRUDO 3	100000	\$F\$7<=\$F\$14	Obligatorio	<u>0</u>
\$E\$7	CRUDO 2	100000	\$E\$7<=\$E\$14	Obligatorio	<u>0</u>

PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN: PLANIFICACIÓN Y SCHEDULING DE UNA REFINERÍA

Cantidades de crudos (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO4fuel	CRUDO 4lub
75000	100000	100000	12500	100000
				112500 CRUDO4total

FUNCIÓN OBJETIVO:

Maximizar el beneficio

3212500

Suministro de crudo disponible (bbl/wk):

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO4total
75000	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):

170000
78750
80000
20000

Demanda
máx(bbl/wk)

170000
85000
85000
20000

Precio (\$/bbl)

45
30
15
60

Ingresos (\$)

7650000
2362500
1200000
1200000

I.Total(\$)

12412500

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 (\$):

1500000	2350000	2250000	350000	2750000
---------	---------	---------	--------	---------

C.totales(\$)

9200000

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):

160000
85000
70000
0

Demanda
máx(bbl/wk)

170000
85000
85000
20000

Precio (\$/bbl)

45
30
15
60

Ingresos (\$)

7200000
2550000
1050000
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:
 - o Ingresos: 12000000
 - o Costes: 8600000
 - o Beneficio: **3400000**
- Sin cadena de lubes:
 - o Ingresos: 10800000
 - o Costes: 8000000
 - o 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.