

ESTIMACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE COSTOS – UNIDAD DE VACÍO

Hernan Milberg / Ignacio Alliat, TECHINT E&C, hmilberg@techint.com / ialliati@techint.com

Sinopsis

En cualquier unidad de procesos dentro de una refinería el análisis de costos es fundamental, tanto en la fase de diseño como en la fase de operación. Este trabajo muestra las modernas técnicas de simulación disponibles para optimizar beneficios, considerando el caso particular de una unidad de vacío.

El objetivo consiste en maximizar los beneficios económicos de la unidad (400 m³/h) sin modificar los equipos existentes, partiendo de un caso base de operación. Para ello, en función de costos estimados para las materias primas, para los cortes entregados a otras unidades como productos, y para los servicios, y teniendo en cuenta las restricciones de los equipos de la unidad (caudales, temperaturas, potencias, etc.), aplica las técnicas de simulación para ajustar las condiciones operativas y optimizar los beneficios.

La simulación del proceso se realizó mediante el software Aspen Hysys, y en particular para la optimización de costos, se recurrió al análisis derivativo junto con la programación secuencial cuadrática (**SQP** según sus siglas en inglés), definiendo las variables operativas, las restricciones y la función objetivo.

Los resultados no solo muestran la posibilidad de aumentar el beneficio económico de la unidad respecto al caso base, sino que permiten detectar qué variables tienen mayor influencia en la optimización.

Introducción

En un contexto de alta competitividad a nivel mundial, la optimización de un proceso industrial resulta de vital importancia para su rentabilidad y aplicabilidad. La necesidad de optimizar costos, el alto precio de la energía, el agotamiento de las materias primas, entre otros factores, contribuyen a la necesidad de optimizar procesos industriales.

En el presente trabajo se propone llevar a cabo la optimización operativa de una unidad de vacío genérica, presente en toda refinería, empleando herramientas de optimización del software de diseño Aspen Hysys. Particularmente, se empleará la utilidad *Derivative* en modo SQP (del inglés, Sequential Quadratic Programming – Programación Secuencial Cuadrática). El objetivo de este estudio consiste en maximizar la ganancia o beneficio económico anual de la unidad en función de una selección de variables operativas sujetas a ciertas restricciones, como se desarrollará a lo largo de este escrito.

A partir del *know-how* adquirido en el diseño de plantas de este tipo, se ha desarrollado un modelo en Hysys de una unidad de vacío genérica, con parámetros de temperatura, presión y composición típicos de este tipo de instalaciones. El diagrama de flujo de la unidad se muestra en la Fig. 1 (ampliado en las Fig. 2 a 6) y se describe a continuación.

El fluido de proceso alimentado a la unidad de vacío (la materia prima a efectos del presente análisis) consiste en el residuo de la unidad de topping, ubicada aguas arriba en la refinería. Este corte de hidrocarburos líquidos pesados se acondiciona para ingresar a la columna de destilación de la unidad

de vacío. Para ello, es bombeado mediante la bomba P-101 a través de dos intercambiadores de calor E-100 y E-101 para ser precalentado y finalmente alimentado al horno F-101. La alimentación al horno requiere un consumo de vapor de agua (ver corriente 10 en Fig. 3). Luego de fluir a través de la línea de transferencia aguas abajo del horno, ingresa a la zona flash de la torre de destilación a presión de vacío.

A partir de dicha destilación, se obtienen cuatro distintos cortes de hidrocarburos como productos, a saber, Residuo de Vacío, Producto Wax, Gasoil Pesado (HGO) y Gasoil Liviano (LGO). El residuo de vacío debe ser enfriado para ser alimentado a la unidad de coque, por lo que el mismo es bombeado por la bomba P-105 y enviado a un intercambiador de calor (Generador de Vapor). Dado que el proceso se encuentra integrado energéticamente, este intercambio térmico se utiliza para generar vapor de media presión como sub-producto de la unidad (ver corriente 45 en Fig. 6). El producto Wax se bombea mediante la bomba P-104 hacia la unidad de cracking catalítico. El HGO es bombeado por la bomba P-103 a través de los aerofriadores AC-101 y AC-102 para ser recirculado a la torre y enviado también al cracking catalítico, respectivamente. Análogamente, el LGO es bombeado por la bomba P-102 a través del aerofriador AC-103 para su envío a hidrotratamiento.

El vacío en la torre se genera a partir de dos eyectores M-101 y M-102. La operación de los mismos implica un consumo de vapor de agua (ver corriente Vapor a Eyectores en Fig. 4). Por otro lado, la condensación entre eyectores, representa un consumo de agua de enfriamiento (ver corrientes 71 y 73 en Fig. 4). Finalmente, las corrientes de salida de los eyectores son separadas en sus fases gaseosa, oleosa y acuosa (ver corrientes 68, 69 y 70 en Fig. 4). La fase oleosa constituye un sub-producto de la unidad llamado Gasoil Barométrico (BGO). En cambio, la fase acuosa representa un costo para la misma ya que deberá ser tratada debido a su contenido ácido. La presión de estas corrientes, posterior a su separación, se realiza mediante el compresor K-101 (corriente gaseosa) y las bombas P-107 y P-106 (corrientes oleosa y acuosa, respectivamente).

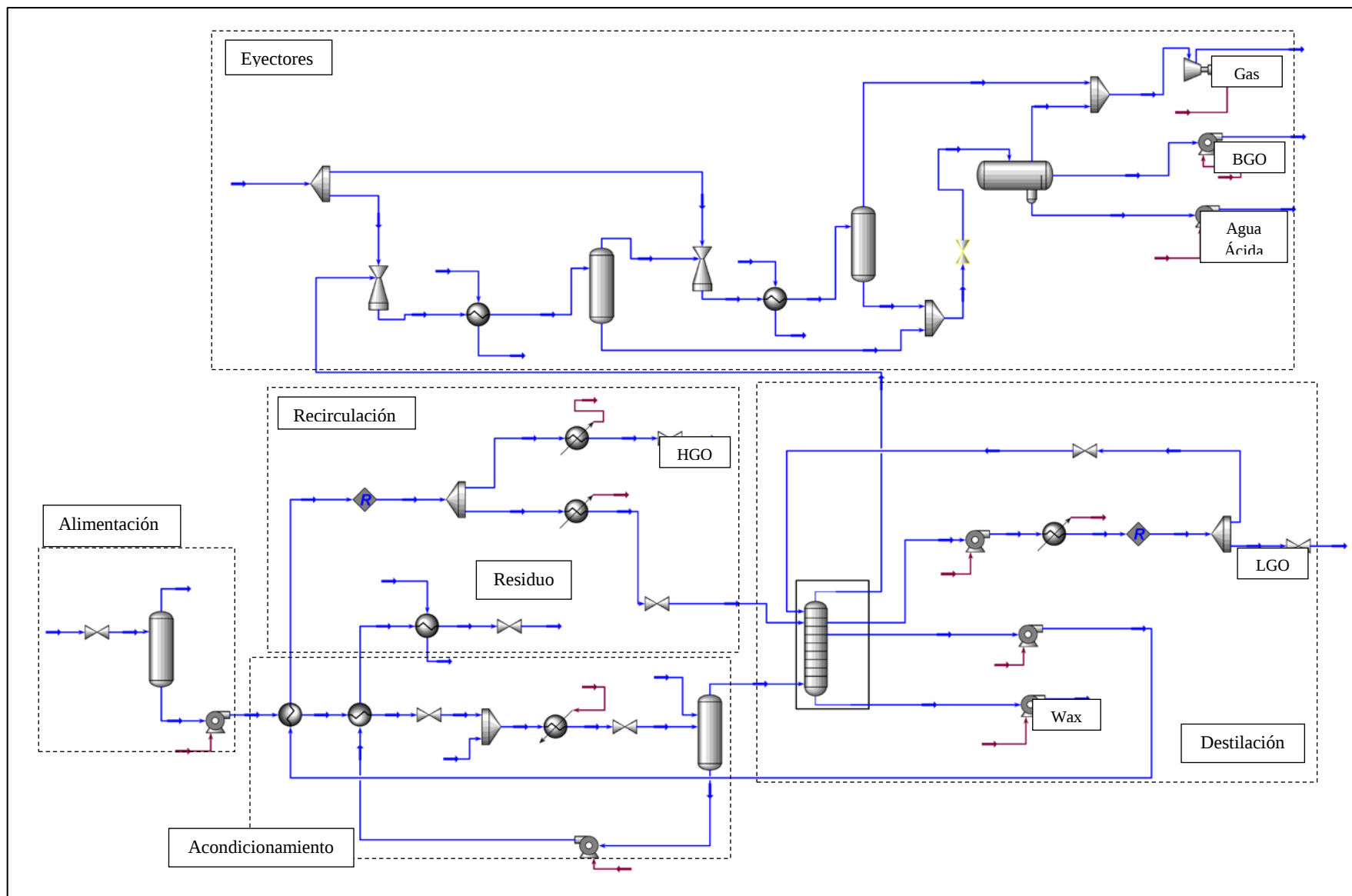
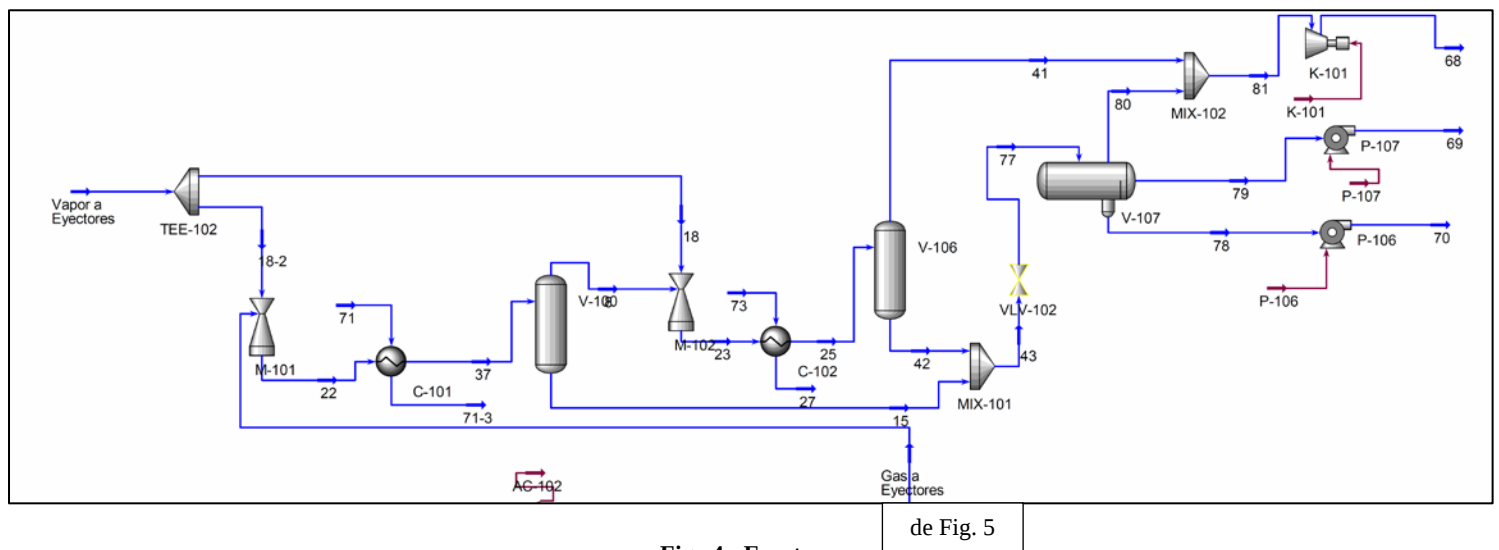
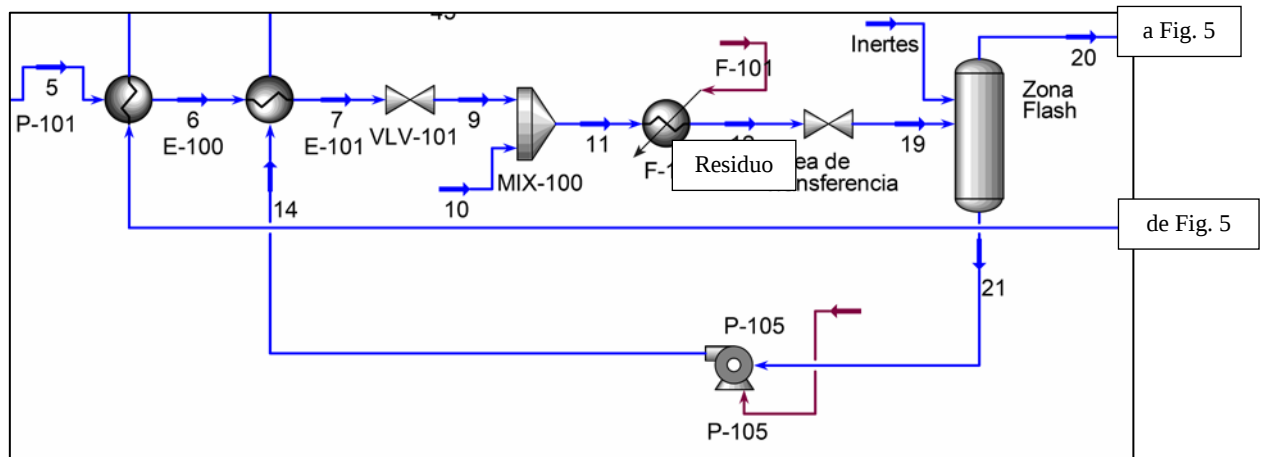
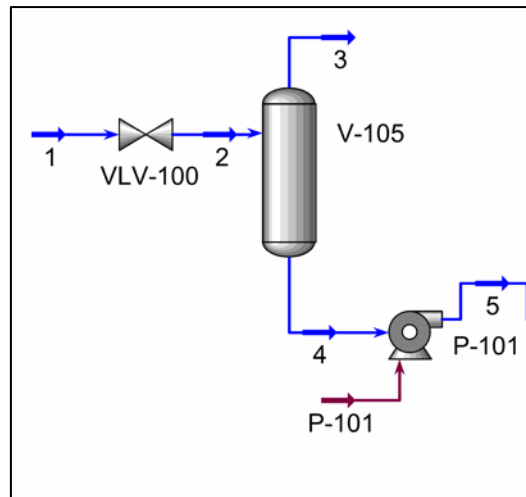


Fig 1 - Diagrama de Flujo de la Unidad de Vacío



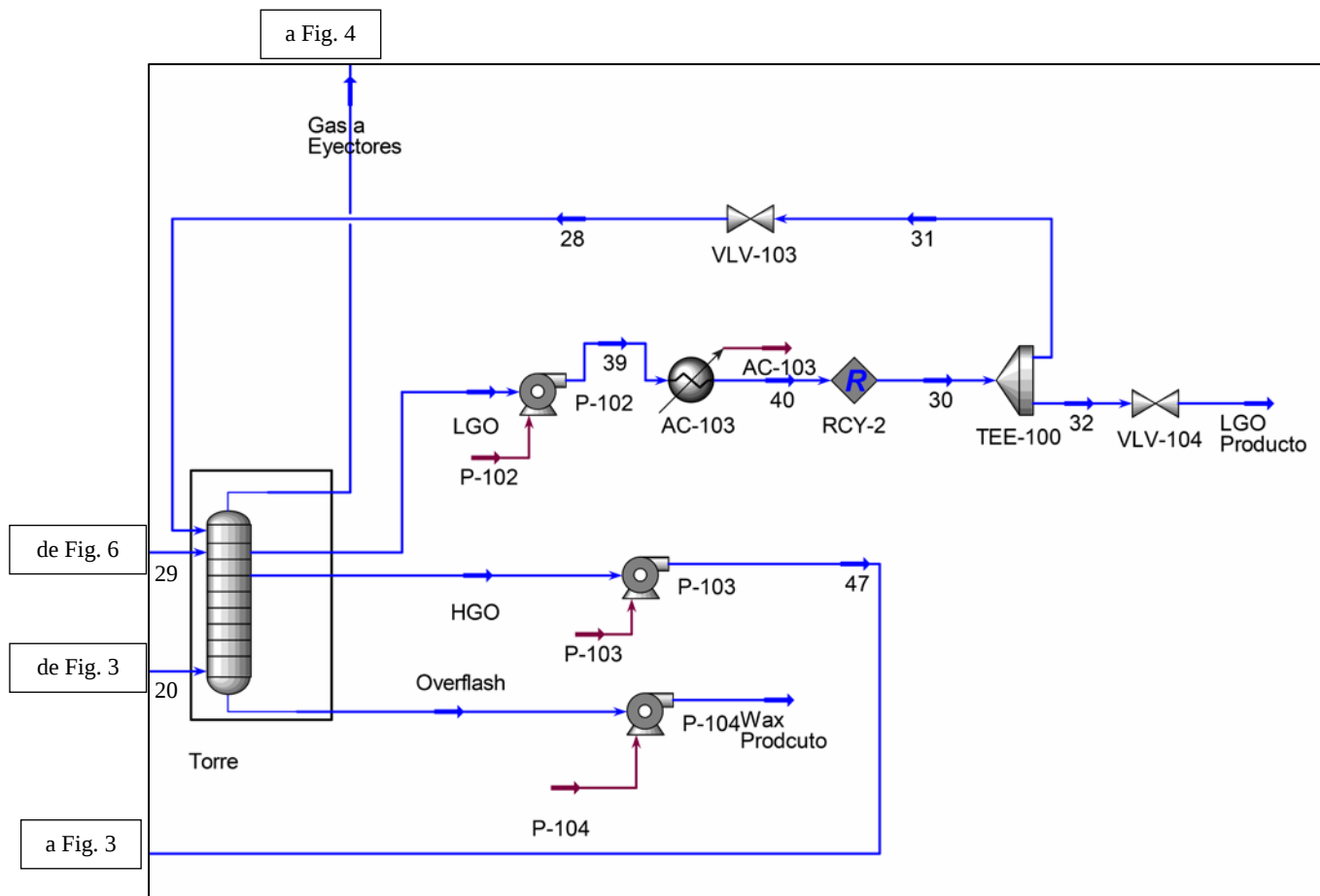


Fig. 5 - Destilación

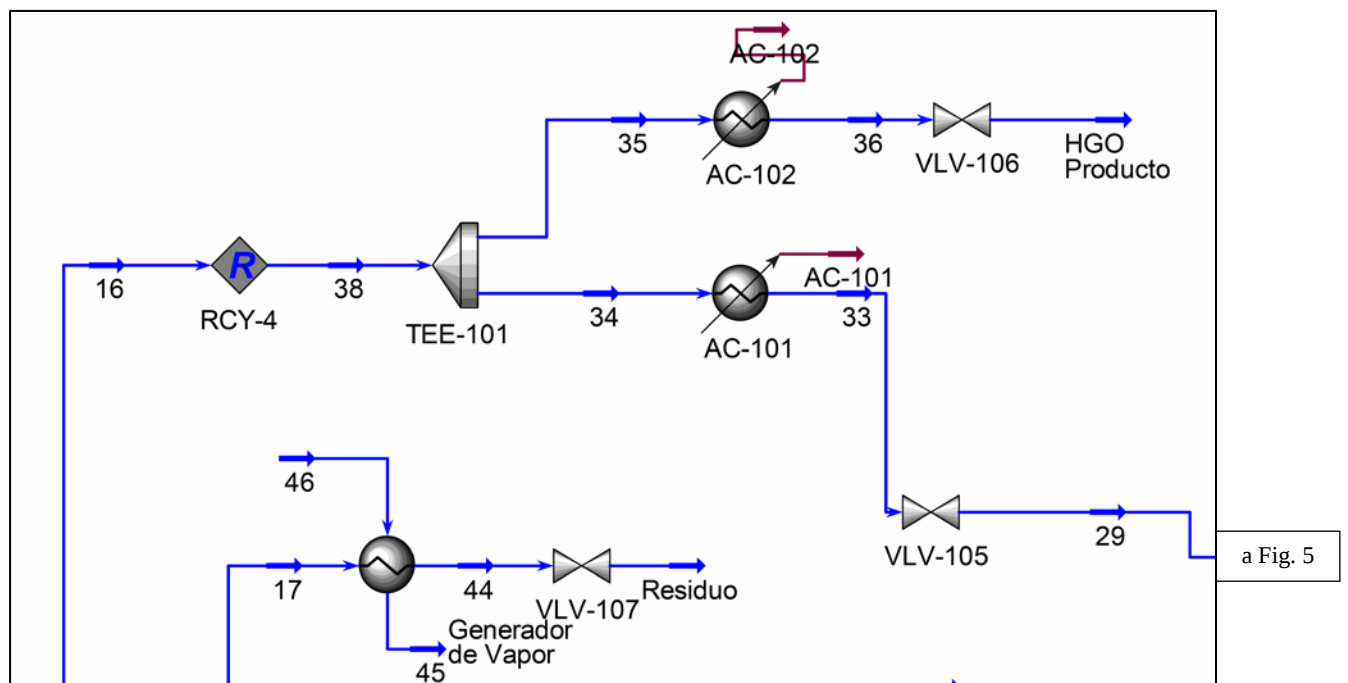


Fig. 6 - Recirculación

Desarrollo

Utilidad de una Herramienta de Optimización Multivariable

En este primer apartado del desarrollo se pretende demostrar la necesidad de una herramienta de optimización multivariable como SQP.

Si se buscara aumentar el beneficio de una unidad de vacío, se intentaría aumentar la cantidad producida de los cortes más valiosos, como HGO y LGO, en detrimento de productos de menor valor como el residuo de la unidad de vacío. Para ello, la temperatura de salida del horno F-101 sería una variable crítica, cuyo valor en la operación base de la unidad es de 390 °C.

Se plantea entonces un **primer caso** de estudio simple (sin utilización SQP), variando solo la temperatura de salida del horno F-101, para evaluar el beneficio de la unidad de vacío manteniendo todas las demás variables independientes fijas. Para ello se utiliza la herramienta *case study* en Hysys. Los datos empleados para el cálculo son los mismos que se detallarán más adelante en la definición del problema de optimización a ser llevado a cabo con la herramienta SQP.

Se puede observar en el siguiente gráfico (ver Fig. 7) que se obtiene una tendencia monótona creciente de la función beneficio con respecto a la temperatura de salida del horno. El beneficio se informa en USD por hora.

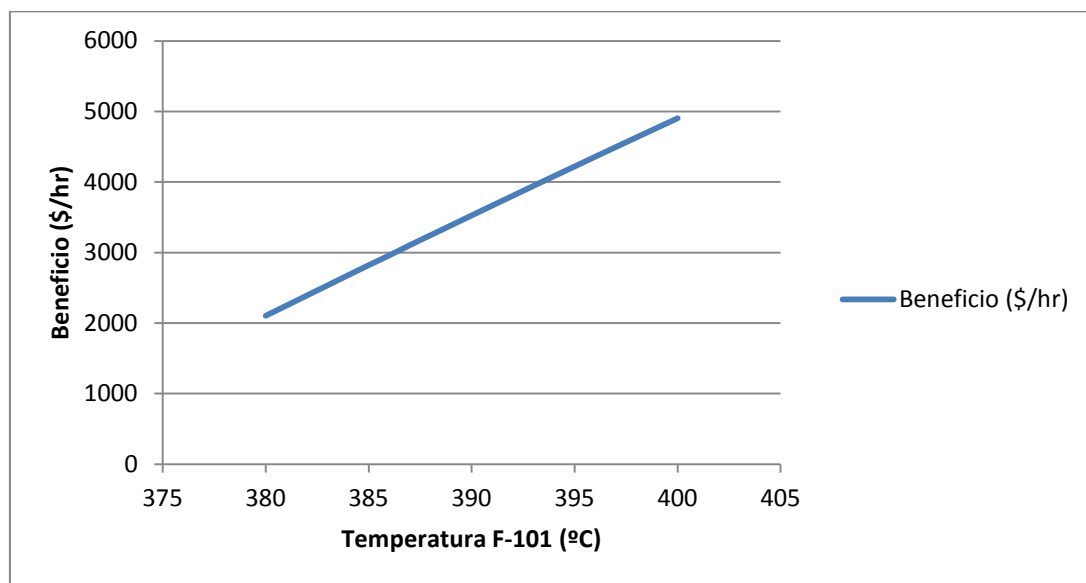


Fig. 7 - Beneficio de la Unidad de Vacío (\$/año)

Luego de observar el gráfico de la Fig. 7, pareciera que conviene indefinidamente aumentar la temperatura de salida del horno. Pero dicha temperatura no puede tomar cualquier valor, ya que la capacidad de calentamiento del horno es limitada. Por este motivo, se analiza el calor intercambiado (*duty*) del F-101 requerido en función de la temperatura de salida alcanzada en la Fig. 8. Se indica también la capacidad máxima del horno F-101 (35000 kW). A partir de la misma, se obtiene que la máxima temperatura de salida del F-101 es de 397 °C.

A partir de este simple análisis se podría tomar la decisión de fijar la temperatura de salida del horno F-101 en 397 °C. En ese caso, los resultados de la simulación indican que el *duty* de los aerofriadores AC-101, AC-102 y AC-103 son 5482, 5810 y 9164 kW, respectivamente. No

obstante, el máximo *duty* para dichos aerofriadores es de 4100, 5500 y 9300 kW respectivamente, por lo que la operación propuesta de la manera que fue simulada no es factible. Estos *dutys* deberían ser reducidos, modificando otras variables como la temperatura del tope de la torre o caudales de recirculación a la misma, entre otras; o fijando la temperatura de salida del horno F-101 en un valor no tanto mayor que el de la operación base.

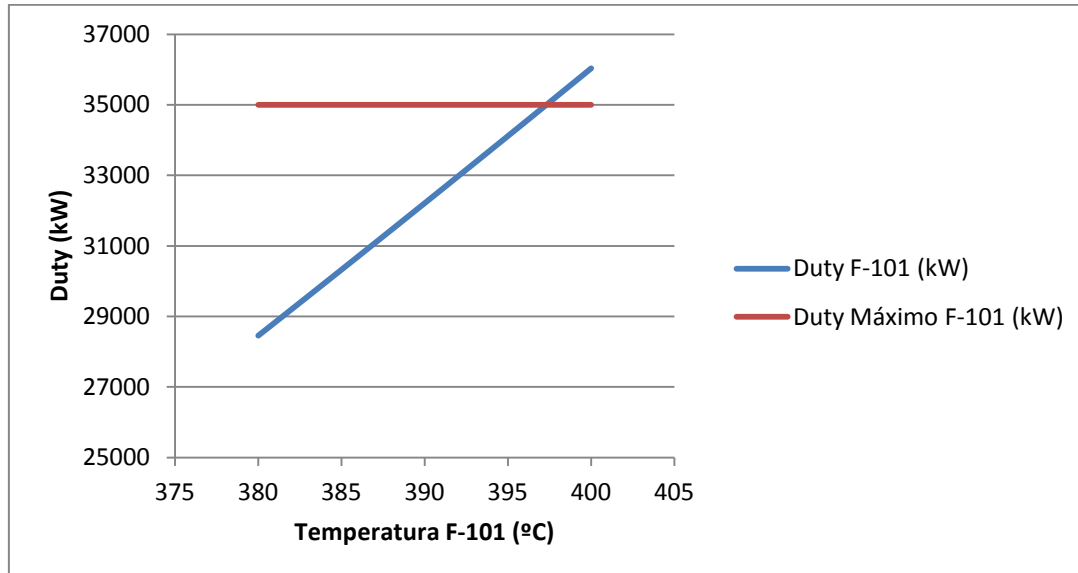


Fig. 8 - Duty F-101 (kW)

Se distinguen entonces dos aspectos de un problema de optimización complejo como el que se intentó llevar a cabo con un case study. Primero, en la gran mayoría de los casos se contará con dos o más variables independientes para la optimización. En segundo lugar, muchas de las variables dependientes del problema de optimización tendrán restricciones que responderán a limitaciones físicas o cinéticas de los equipos y utilidades de la unidad y que por tanto deberán ser respetadas.

De este modo, surge la necesidad de contar con un método de optimización multivariable que a su vez permita maximizar una función sujeto a ciertas restricciones. Entre ellos, los métodos que emplean SQP se destacan por la robustez y rapidez de su algoritmo.

Metodología de Optimización de SQP

Hysys ofrece un optimizador multivariable en su modo estacionario que puede ser aplicado con numerosos métodos, siendo SQP uno de ellos. Este algoritmo es comúnmente considerado el método de optimización más eficiente para problemas con restricciones lineales y no lineales, siempre y cuando se emplee un punto inicial razonable y se tenga un número pequeño de variables primarias. Tanto la función a optimizar como las restricciones deben ser dos veces continuamente diferenciables. El método SQP resuelve una secuencia de sub-problemas de optimización, cada uno de los cuales optimiza una aproximación cuadrática de la función objetivo, sujeta a una aproximación lineal de una de las restricciones.

Una vez que la simulación fue armada y convergida hacia una solución, se puede emplear el optimizador para encontrar las condiciones de operación que minimicen o maximicen una función determinada, denominada función objetivo (objective function). Por otro lado, para la optimización debe definirse qué variables podrán ser manipuladas por el optimizador para lograr el objetivo. Estas

últimas reciben el nombre de variables primarias. Asimismo, debe indicarse el rango en que se permite su variación. Finalmente, deben especificarse restricciones para la variación de las variables dependientes (constraints functions). En el modo SQP del optimizador de Hysys se definen como desigualdades, indicando los valores mínimo y máximo que la variable dependiente puede tomar.

Problema de Optimización – Datos

Para este estudio, se plantea la función objetivo como el beneficio económico horario de la unidad de vacío. Para ello se contemplarán las siguientes contribuciones a dicha función.

δ_1 = Ingreso por ventas de LGO, HGO, Producto Wax y Residuo (\$/hr)

δ_2 = Ingresos por Subproductos (\$/hr)

δ_3 = Costo de Materias Primas y Utilidades (\$/hr)

δ_4 = Costo de Electricidad y Fuel Gas consumidos (\$/hr)

δ_5 = Costos Adicionales (\$/hr)

Beneficio (\$/hr) = $\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 - \delta_4 - \delta_5$

En las siguientes tablas se detallan los precios y costos unitarios de las diversas contribuciones a la función beneficio (ver Tablas 1 a 5). Dichos costos fueron obtenidos de distintos proyectos realizados en los últimos años y de revistas de publicación del área de Oil&Gas. También se indican, en cursiva, valores extensivos de producción y consumos correspondientes al caso base de la operación de la unidad.

Producto	Corriente	Precio	Caudal	Ingreso
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Gasoil Liviano	LGO Producto	0.40	<i>31707</i>	<i>12683</i>
Gasoil Pesado	HGO Producto	0.30	<i>106168</i>	<i>31850</i>
Producto Wax	Wax Producto	0.15	<i>14714</i>	<i>2207</i>
Residuo	Residuo	0.10	<i>226028</i>	<i>22603</i>
δ_1 (\$/h)				<i>69343</i>

Tabla 1 - Función Beneficio - Caso Base - δ_1

Sub Producto	Corriente	Precio	Caudal	Ingreso
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Vapor Generado	45	0.05	<i>15960</i>	<i>798</i>
BGO	69	0.20	<i>1304</i>	<i>261</i>
δ_2 (\$/h)				<i>1059</i>

Tabla 2 - Función Beneficio - Caso Base - δ_2

Consumo	Corriente	Precio	Caudal	Gasto
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Alimentación	1	-0.15	379920	-56988
Vapor a Horno	10	-0.05	1500	-75
Vapor a Eyectores	Vapor a Eyectores	-0.05	8501	-425
Agua 1	71	-0.002	912922	-2145
Agua 2	73	-0.002	70657	-166
δ3 (\$/h)				-59799

Tabla 3 - Función Beneficio - Caso Base - δ3

Consumo	Equipo	Costo	Consumo	Gasto
-	-	\$/kW	kW	\$/h
Electricidad	K-101	-0.0000460	3.61	-0.60
Electricidad	P-101	-0.0000460	324	-54
Electricidad	P-102	-0.0000460	188	-31
Electricidad	P-103	-0.0000460	265	-44
Electricidad	P-104	-0.0000460	7.33	-1.21
Electricidad	P-105	-0.0000460	303	-50
Electricidad	P-106	-0.0000460	2.57	-0.42
Electricidad	P-107	-0.0000460	0.54	-0.09
Electricidad	AC-102	-0.0000460	5046	-836
Electricidad	AC-101	-0.0000460	3414	-565
Electricidad	AC-103	-0.0000460	9157	-1516
Fuel Gas	F-101	-0.0000256	32211	-3957
δ4 (\$/h)				-7055

Tabla 4 - Función Beneficio - Caso Base - δ4

Consumo	Corriente	Costo	Caudal	Gasto
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Tratamiento Agua Ácida	70	-0.002	9997	-20
δ5 (\$/h)				-20

Tabla 5 - Función Beneficio - Caso Base - δ5

De este modo, se obtiene el siguiente valor para la función objetivo (beneficio económico horario) en la operación de la unidad de vacío correspondiente al caso base.

Beneficio - Caso Base (\$/h)	3527
-------------------------------------	-------------

Resulta importante destacar que en este análisis sólo se han considerado costos operativos. Los costos de inversión no han sido tenidos en cuenta ya que no se definieron variables primarias que pudieran modificarlos en la optimización.

Problema de Optimización – Variables Primarias

Las variables primarias definidas para este problema de optimización se detallan en la Tabla 6, junto con el rango de variación fijado por el usuario. Se informa en cursiva el valor de cada variable en la operación base de la unidad.

Variable Primaria		Corriente	Mínimo	Base	Máximo
Temperatura de Salida F-101	°C	12	380	390	400
Producción de Gasoil Pesado	kmol/h	38	750	817	1000
Producción de Gasoil Liviano	kg/h	30	300000	338971	380000
Reflujo de Gasoil Pesado	m ³ /h	34	270	300	350
Temperatura de Gasoil Liviano	°C	30	50	55	60
Temperatura del Plato #1	°C	-	55	65	70

Tabla 6 - Variables Primarias - Caso Base

Problema de Optimización – Restricciones

Las restricciones que se imponen al problema de optimización deben responder a limitaciones físicas de una instalación bajo estudio, ya sea capacidad de equipos o disponibilidad de utilidades. En la Tabla 7 se muestran las restricciones consideradas para este caso. Se informa en cursiva el valor de cada variable en la operación base de la unidad.

Variable Restringida		Equipo / Corriente	Mínimo	Base	Máximo
Duty	kW	F-101	25000	32211	35000
Duty	kW	AC-101	0	3414	4100
Duty	kW	AC-102	0	5046	5500
Duty	kW	AC-103	0	9157	9300
Potencia	kW	P-102	120	188	200
Potencia	kW	P-103	190	265	290
Potencia	kW	P-104	5	7.3	10
Potencia	kW	P-105	290	303	320
Potencia	kW	P-106	0.5	2.6	3
Potencia	kW	P-107	0.1	0.54	1
Potencia	kW	K-101	1.2	3.6	5
Vapor	kg/h	Vapor a Eyectores	0	8501	10000
Agua de Enfriamiento	kg/h	71	0	912922	992000

Tabla 7 - Restricciones - Caso Base

Existe además una correlación lógica entre las restricciones y las variables primarias. Por ejemplo, si se pretende aumentar la temperatura de salida del horno F-101 (variable primaria), debe considerarse el máximo calentamiento que puede ofrecer el horno F-101 (la capacidad máxima de intercambio térmico del horno deberá ser una restricción en ese caso). Asimismo, si se quiere aumentar la producción de gasoil pesado, debe garantizarse que el aroenfriador y la bomba asociados a dicha corriente, puedan acondicionarla correctamente para su envío a la unidad aguas abajo que corresponda, considerando el nuevo caudal. En ese caso, la capacidad de intercambio térmico del aroenfriador y la potencia de la bomba deberán ser variables restringidas.

Problema de Optimización – Resultados

En la presente sección se presentarán los resultados de la optimización. Se informarán en primer lugar, los valores que toman tanto las variables primarias (ver Tabla 8) como las restricciones (ver Tabla 9).

Variable Primaria		Corriente	Mínimo	Base	Optimizado	Máximo
Temperatura de Salida F-101	°C	12	380	390	392	400
Producción de Gasoil Pesado	kmol/h	38	750	817	798	1000
Producción de Gasoil Liviano	kg/h	30	300000	338971	338353	380000
Reflujo de Gasoil Pesado	m ³ /h	34	270	300	289	350
Temperatura de Gasoil Liviano	°C	30	50	55	55	60
Temperatura del Plato #1	°C	-	55	65	69	70

Tabla 8 - Variables Primarias - Caso Optimizado

Variable Restringida		Equipo / Corriente	Mínimo	Base	Optimizado	Máximo
Duty	kW	F-101	25000	32211	32871	35000
Duty	kW	AC-101	0	3414	4049	4100
Duty	kW	AC-102	0	5046	5112	5500
Duty	kW	AC-103	0	9157	9144	9300
Potencia	kW	P-102	120	188	188	200
Potencia	kW	P-103	190	265	260	290
Potencia	kW	P-104	5	7.3	7.3	10
Potencia	kW	P-105	290	303	300	320
Potencia	kW	P-106	0.5	2.6	2.6	3
Potencia	kW	P-107	0.1	0.54	0.54	1
Potencia	kW	K-101	1.2	3.6	3.6	5
Vapor	kg/h	Vapor a Eyectores	0	8501	8489	10000
Agua de Enfriamiento	kg/h	71	0	912922	911625	992000

Tabla 9 - Restricciones - Caso Optimizado

A continuación, se informan los valores para los distintos componentes de la función objetivo (ver Tablas 10 a 14), y finalmente el valor del beneficio económico horario luego de la optimización (ver Tabla 15).

Producto	Corriente	Precio	Caudal	Ingreso
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Gasoil Liviano	LGO Producto	0.40	31818	12727
Gasoil Pesado	HGO Producto	0.30	108187	32456
Producto Wax	Wax Producto	0.15	14721	2208
Residuo	Residuo	0.10	223892	22389
			δ1 (\$/h)	69781

Tabla 10 - Función Beneficio - Caso Optimizado - δ1

Sub Producto	Corriente	Precio	Caudal	Ingreso
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Vapor Generado	45	0.05	16051	803
BGO	69	0.20	1300	260
δ2 (\$/h)				1063

Tabla 11 - Función Beneficio - Caso Optimizado - δ2

Consumo	Corriente	Precio	Caudal	Gasto
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Alimentación	1	-0.15	379920	-56988
Vapor a Horno	10	-0.05	1500	-75
Vapor a Eyectores	Vapor a Eyectores	-0.05	8489	-424
Agua 1	71	-0.002	911625	-2142
Agua 2	73	-0.002	70657	-166
δ3 (\$/h)				-59796

Tabla 12 - Función Beneficio - Caso Optimizado - δ3

Consumo	Equipo	Costo	Caudal	Gasto
-	-	\$/kW	kW	\$/h
Electricidad	K-101	-0.0000460	3.61	-0.60
Electricidad	P-101	-0.0000460	324	-54
Electricidad	P-102	-0.0000460	188	-31
Electricidad	P-103	-0.0000460	260	-43
Electricidad	P-104	-0.0000460	7.34	-1.22
Electricidad	P-105	-0.0000460	300	-50
Electricidad	P-106	-0.0000460	2.56	-0.42
Electricidad	P-107	-0.0000460	0.54	-0.09
Electricidad	AC-102	-0.0000460	5112	-846
Electricidad	AC-101	-0.0000460	4049	-671
Electricidad	AC-103	-0.0000460	9144	-1514
Fuel Gas	F-101	-0.0000256	32871	-4038
δ4 (\$/h)				-7249

Tabla 13 - Función Beneficio - Caso Optimizado - δ4

Consumo	Corriente	Costo	Caudal	Gasto
-	-	\$/kg	kg/h	\$/h
Tratamiento Agua Ácida	70	-0.002	9985	-20
δ5 (\$/h)				-20

Tabla 14 - Función Beneficio - Caso Optimizado - δ5

Se puede observar que la producción de los cortes más valiosos (HGO y LGO) ha sido aumentada en detrimento del corte menos valioso (residuo de vacío). Finalmente, se obtiene el siguiente beneficio económico (ver Tabla 15).

Beneficio Optimizado	\$/hr	3779
Beneficio Optimizado	\$/año	33102818
Δ Beneficio Optimizado - Caso Base	\$/hr	252
Δ Beneficio Optimizado - Caso Base	\$/año	2204957
Δ Beneficio Optimizado - Caso Base relativo	%	6.89%

Tabla 15 - Función Beneficio - Resultados

Conclusiones

En este trabajo, se llevó a cabo la optimización de los parámetros operativos de una unidad de vacío genérica de una refinería. Se pudo concluir que el beneficio económico anual puede ser incrementado en un 6.89 % modificando únicamente variables operativas de la instalación; es decir, sin reemplazar ni agregar ningún equipo.

Por otro lado, se concluye que el modo SQP de la utilidad *Derivative* de Hysys resulta una herramienta muy útil para optimizar un proceso fisicoquímico como el de una unidad de vacío. Se destaca la robustez del algoritmo, capaz de llevar a cabo con resultados reproducibles una optimización con 6 variables independientes y 13 restricciones como fue el caso de este estudio.

Bibliografía

- “Optimización de una Estabilización de Gasolina (SQP)” – Manual de AspenTech.
- "Refinery Process Modeling", Kaes Gerald L., Kaes Enterprises, 2000.

Curriculum Vitae

- **Hernán Milberg**
Ingeniero Químico – Universidad de Buenos Aires
Empresas en las que ha trabajado: Techint Ingeniería y Construcción – Grupo Ace
Ingeniero de Procesos
- **Ignacio Allati**
Ingeniero Químico – Universidad de Buenos Aires
Empresas en las que ha trabajado: Techint Ingeniería y Construcción – Tecna
Ingeniero de Procesos