



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA CONOCER LA  
FLEXIBILIDAD OPERATIVA DE UNA BOMBA DE  
ANILLO LÍQUIDO EN LA TORRE DE VACÍO 2”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**RAFAEL GONZÁLEZ HERNÁNDEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: ORTIZ RAMIREZ JOSE ANTONIO**

**VOCAL: MENDEZ FREGOSO HECTOR GERARDO**

**SECRETARIO: BARRAGAN AROCHE JOSE FERNANDO**

**1er. SUPLENTE: LOPEZ CASTILLO NESTOR NOE**

**2° SUPLENTE: HINOJOSA GOMEZ HUMBERTO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**4° PISO ALA SUR, TORRE DE INGENIERIA, CIUDAD UNIVERSITARIA**

**ASESOR DEL TEMA:**

\_\_\_\_\_  
Dr. BARRAGAN AROCHE JOSE FERNANDO

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

\_\_\_\_\_  
Ing. GARZA PUIG GUILLERMO

**SUSTENTANTE:**

\_\_\_\_\_  
GONZÁLEZ HERNÁNDEZ RAFAEL



Índice.....	4
Lista de símbolos y unidades.....	6
Objetivos.....	9
Capítulo 1. Introducción.....	10
Proceso de destilación.....	10
Destilación al vacío.....	11
Sistema de vacío.....	14
Clasificación técnica del vacío.....	16
Bomba de vacío.....	17
Capítulo 2. Planteamiento del problema.....	19
Descripción del sistema analizado.....	21
Consideraciones para diseño.....	22
Metodología de solución.....	23
Balances a considerar en una torre de destilación multicomponente.....	25
Algoritmo para estimar el comportamiento de una columna de destilación multicomponente.....	29
Capítulo 3. Desarrollo.....	33
Algoritmo de simulación.....	33
Validando la simulación.....	43
Simulando el sistema de vacío.....	44
Análisis del comportamiento de la salida del domo contra la presión en el domo de la torre.....	45
Efectos de presión contra composición sobre la torre de destilación al vacío.....	46
Capítulo 4. Resultados.....	47
Análisis de flexibilidad operativa.....	52
Análisis de flexibilidad operativa de la corriente del Domo.....	53
Análisis de flexibilidad operativa de la corriente de GOL.....	56
Análisis de flexibilidad operativa de la corriente de GOP.....	59
Análisis de flexibilidad operativa de la corriente de RV.....	62
Análisis de tanques VF2 y VFA3.....	65
Conclusión.....	73

Índice de tablas y Figuras.....	75
Bibliografía.....	78
Anexo 1.....	80

## Lista de símbolos y unidades

- Api: American Petroleum Institute.
- ASTM: American Society for Testing Materials.
- CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono.
- F.C.C.: Unidad de desintegración catalítica.
- F<sub>J</sub>: Flujo de entrada al plato J.
- g = aceleración gravitatoria.
- GOL: Gasóleo ligero de vacío.
- GOP: Gasóleo pesado de vacío.
- H<sub>2</sub>O: Agua.
- H<sub>2</sub>S: Ácido Sulfúrico.
- He: Helio.
- H<sub>fJ</sub>: Entalpía del flujo F en la entrada al plato J.
- H<sub>LJ</sub>: Entalpía del líquido del plato J.
- H<sub>LJ-1</sub>: Entalpía de la corriente de líquido que entra desde el plato superior a J.
- HV: Alto vacío, del inglés *high vacuum*, presión absoluta de gas en el alcance de 0,1 Pa a 10 μPa.
- H<sub>VJ</sub>: Entalpía del vapor del plato J.
- H<sub>VJ+1</sub>: Entalpía de la corriente de vapor que entra desde el plato inferior a J.
- L<sub>J</sub>: Corriente de líquido que sale del plato J.
- L<sub>J-1</sub>: Corriente de líquido que entra desde el plato superior a J.
- LV: Bajo vacío, del inglés *low vacuum*, presión absoluta de gas en el alcance de 100 kPa a 100 Pa.
- MV: Medio vacío, del inglés *medium vacuum*, presión absoluta de gas en el alcance de 100 Pa a 0,1 Pa.
- P = presión a lo largo de la corriente.
- P<sub>fJ</sub>: Presión del flujo F en la entrada al plato J.
- P<sub>J</sub>: Presión del plato J.
- P<sub>J</sub>: Presión del plato J.

- $P_{J+1}$ : Presión de la corriente de vapor que entra desde el plato inferior al plato J.
- $P_{J-1}$ : Presión de la corriente de líquido que entra desde el plato superior al plato J.
- PR: Modelo termodinámico Peng-Robingson.
- $Q_J$ : El calor transferido en el plato J, puede entrar o salir del sistema.
- RV: Residuo de vacío.
- TEG: Trietilen Glicol.
- $T_{fJ}$ : Temperatura del flujo F en la entrada al plato J.
- $T_J$ : Temperatura del plato J.
- $T_J$ : Temperatura del plato J.
- $T_{J+1}$ : Temperatura de la corriente de vapor que entra desde el plato inferior a J.
- $T_{J-1}$ : Temperatura de la corriente líquida que entra desde el plato superior a J.
- UHV: Ultra alto vacío, del inglés *ultra high vacuum*, presión absoluta de gas menor a 10  $\mu\text{Pa}$ .
- $U_J$ : Toma lateral de líquido que sale del plato J.
- $V$  = velocidad del fluido de la sección considerada.
- $V_J$ : Corriente de vapor que sale del plato J.
- $V_{J+1}$ : Corriente de vapor que entra desde el plato inferior a J.
- $W_J$ : Toma lateral de vapor que sale del plato J.
- $x_{iJ}$ : Composición del componente i en la corriente líquida que sale del plato J.
- $x_{iJ-1}$ : Composición del componente i en la corriente de líquido que entra desde el plato superior a J.
- $y_{iJ}$ : Composición del componente i en la corriente de vapor que sale del plato J.
- $y_{iJ+1}$ : Composición del componente i en la corriente de vapor que entra desde el plato inferior a J.
- $z$  = altura en la dirección de atracción gravitacional.

- $z_{ij}$ : Composición del componente  $i$  en la etapa  $j$  en el flujo de entrada al plato  $J$ .
- $\rho$  = densidad del fluido.

### Unidades

Propiedad	Símbolo	Unidades
Presión	mmHg	Milímetros de Mercurio
Presión	kg/cm <sup>2</sup>	Kilogramos por centímetro cuadrado
Presión	kPa	Kilopascales
Presión	mmHgabs	Milímetros de mercurio absolutos
Temperatura	°C	Grados Celsius
Flujo Másico	kg/h	Kilogramos por hora
Flujo Volumétrico	BPD	Barriles por día
Flujo energético	kJ/h	Kilojoules por hora

## Objetivos

Debido a la escasez de datos se supone que la alimentación puede ser representada aceptablemente por la mezcla de las corrientes de salida, de las cuales si se tienen análisis ASTM1160. Se pretende verificar si esto es correcto.

Determinar si la torre de destilación del caso de estudio logra operar a diferentes presiones a la de diseño, así como analizar qué impacto tiene esto sobre los productos de la torre. (1)

Estimar si el acoplar una bomba de vacío de anillo líquido posterior al sistema de eyectores de una torre de destilación al vacío puede cumplir con los requerimientos de vacío de dicha torre.

Al no tener un aislamiento térmico la columna de destilación, se pretende comprobar mediante la simulación de un condensador y un rehervidor si la columna en efecto no requiere energía adicional al operar, lo cual se hará por medio de un análisis térmico.

No existe antecedente en la literatura abierta donde se describa y lleve a cabo la simulación del sistema de vacío con la existencia de una corriente de salida en el domo de la columna. Por lo cual se busca corroborar si es factible desarrollar tal simulación y el efecto que tiene de manera integral con el sistema de vacío. (2)

Determinar que efectos tiene una torre de destilación al vacío de una refinería mexicana después de una modificación de la configuración que produce el vacío, basada en el acoplamiento de una bomba de vacío de anillo líquido posterior al sistema de eyectores.

## Capítulo 1. Introducción

### Proceso de destilación

La destilación o fraccionamiento (3), del crudo es una operación que permite separar cortes o productos petrolíferos que son una mezcla compleja de hidrocarburos.

El principio físico en el que se basa el proceso de destilación es la diferencia de volatilidad de los componentes, pues a mayor volatilidad alcanzará mayor presencia en el vapor de la zona estudiada y a menor volatilidad tendrá mayor presencia en el líquido de la zona estudiada, por tal motivo en las columnas de destilación se adecuan las condiciones termodinámicas para obtener o "condensar" los combustibles especificados.

El fraccionamiento del crudo se completa en dos etapas, en la primera se procesa en unidades de destilación atmosférica, donde la presión de trabajo es típicamente la presión atmosférica del lugar. Los combustibles obtenidos por este fraccionamiento son enviados a tanques o como carga de otras unidades que completan su refinado.

Gran parte del crudo procesado en unidades de destilación atmosférica no se vaporiza, ya que para lograrlo sería necesario elevar la temperatura de trabajo sobre el umbral de descomposición térmica.

Por tal motivo este residuo atmosférico se bombea a la Unidad de Vacío, donde se opera a presión muy baja lo que permite destilarlo a menores temperaturas sin descomponer la estructura molecular.

Para que se produzca la separación o fraccionamiento de los cortes, se debe alcanzar el equilibrio entre las fases líquido-vapor, ya que de esta manera los componentes más ligeros o de menor peso molecular se concentran en la fase vapor y por el contrario los componentes pesados o de mayor peso molecular

predominan en la fase líquida, aprovechando así las diferencias de volatilidad de los hidrocarburos.

El equilibrio líquido-vapor, depende principalmente de las variables de proceso, presión y temperatura del sistema; así como de las propiedades del material. Las unidades se diseñan para que se produzcan estos equilibrios en forma controlada y durante el tiempo necesario para obtener los cortes especificados.

Básicamente el proceso consiste en vaporizar los hidrocarburos del crudo y luego condensarlos en cortes definidos en función de dos parámetros principalmente, las temperaturas inicial y final de ebullición de esta mezcla. Obteniendo a lo largo de la columna un perfil de temperaturas donde la temperatura más elevada se encuentra en el fondo de la columna y la menor en el domo de la misma. Ver Fig. 1

### Destilación al Vacío

Destilación al vacío es la destilación a presión por debajo de la atmosférica, pero no tan baja para ser considerada como destilación molecular. Artículos sobre la destilación molecular dejan la impresión general de que sólo surtirá efecto a presiones del orden de  $10^{-4}$  mmHg y que la distancia de la superficie de condensación desde la superficie de evaporación debe ser inferior a un recorrido libre medio de las moléculas de vapor. (4)

La destilación al vacío es utilizada para separar productos sensibles al calor, con puntos de ebullición altos, tales como los destilados pesados contenidos en el petróleo de los cuales se obtienen gasóleos ligeros y gasóleos pesados de vacío y residuos de vacío.

El residuo primario de una destilación atmosférica todavía contiene una gran cantidad de gasóleo cuando sale por el fondo de la torre fraccionadora. Para poder extraer este producto se tendría que calentar más el residuo pero al

hacer esto se corre el riesgo de que algunos de sus componentes se desintegren.

El método que ha demostrado los mejores resultados para obtener productos adecuados de un crudo reducido es la destilación al vacío. Cuando se disminuye la presión, la ebullición se efectúa a una menor temperatura y se elimina el riesgo de provocar la descomposición de los componentes de la mezcla. El volumen de una torre de este tipo es mayor, ya que de esta manera se ayuda a mantener la baja presión.

Normalmente se emplean eyectores de vapor que son equipos, sin partes móviles, como válvulas, pistones, rotores, etc. Su funcionamiento está dado por el principio de conservación de la cantidad de movimiento de las corrientes involucradas. Los eyectores, son máquinas cuyo trabajo se basa en la transmisión de energía por impacto de un flujo a gran velocidad, contra otro flujo a menor velocidad, para proporcionar una mezcla de fluido a una velocidad moderadamente elevada, que luego disminuye hasta obtener una presión final mayor que la inicial del fluido de menor velocidad.

El vacío en la torre de destilación puede efectuarse mediante un sistema de eyectores de vapor. El sistema de vacío elimina del sistema los vapores y cualquier otro gas incondensable. La totalidad de los vapores se alimenta a un condensador de superficie, mediante el empleo de este condensador y los eyectores, los vapores son eliminados del sistema. La principal ventaja de este sistema es que posibilita la recuperación más fácil de un porcentaje de vapores condensables del petróleo que salen por la parte superior de la torre.

Las unidades de vacío, están diseñadas para operar en condiciones adecuadas termodinámicamente para destilar las fracciones pesadas del crudo, sin que se produzca la descomposición térmica de las mismas. Para lograrlo se disminuye la presión de trabajo en la zona de carga de la columna de destilación.

En esta unidad, la energía necesaria para la operación es suministrada totalmente en hornos, diseñados para minimizar la pérdida de carga de modo tal que se opera con la menor presión posible en los puntos donde se inicia la vaporización.

La carga parcialmente vaporizada al salir de los hornos es enviada a la zona de carga de la columna de destilación, donde se produce una corriente ascendente de vapores y otra descendente de líquidos. En estas columnas el principio de operación es el equilibrio líquido vapor, es decir la condensación de los vapores y evaporación de líquidos.

La torre tiene características particulares, que la diferencian de las fraccionadoras atmosféricas. Los elementos mecánicos para producir el contacto líquido - vapor, son rellenos especiales ubicados en lechos ordenados que permiten incrementar la superficie de interfaz, favoreciendo la transferencia de masa.

El diámetro de la columna es diferente en la zona de condensación, respecto de la zona superior o inferior de la misma. La zona de condensación o fraccionamiento tiene el mayor diámetro ya que las pérdidas de carga deben ser despreciables para mantener el vacío homogéneo en la totalidad de la torre. Ver Fig. 1.

La zona del Domo es de diámetro menor ya que el caudal de vapores en esta zona es muy bajo debido a que los productos solo son obtenidos lateralmente y no por el Domo. El fondo de la columna tiene el menor diámetro, ya que se debe minimizar el tiempo de residencia del RV para evitar la descomposición térmica y formación de carbón en la torre.

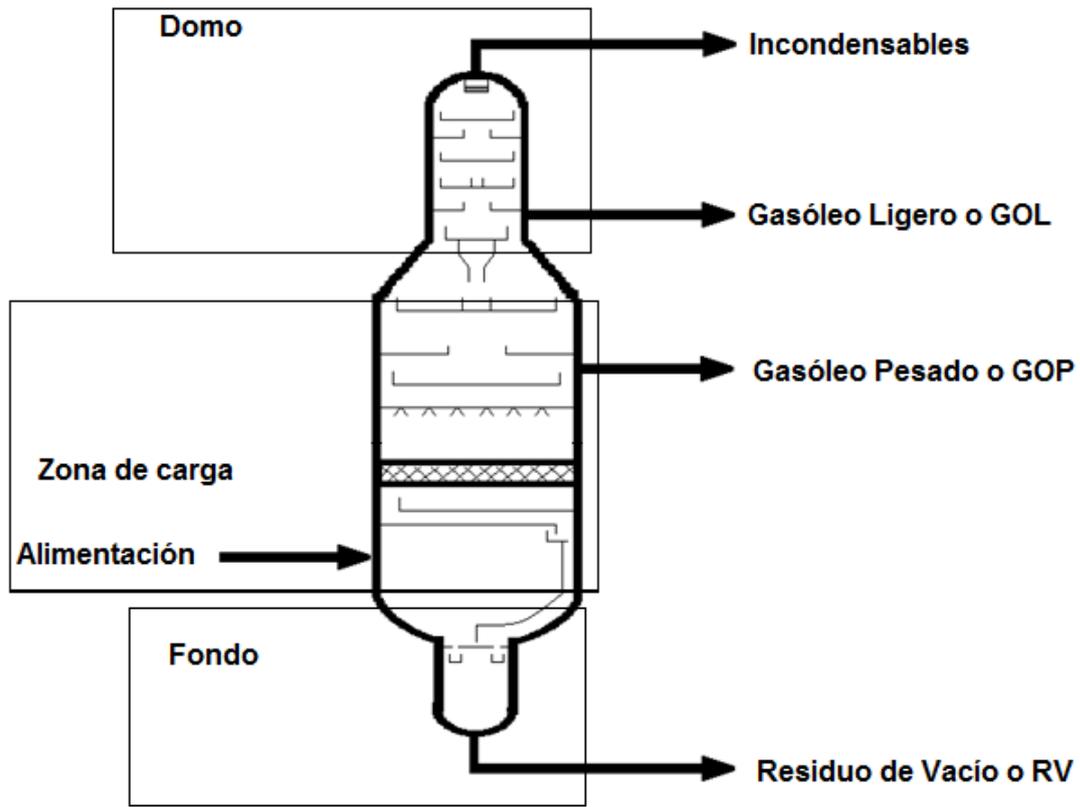


Fig. 1. Diagrama de una torre de destilación al vacío.

## Sistema de vacío

Los eyectores, definidos previamente, son equipos capaces de disminuir la presión de un líquido o un gas mediante el arrastre del fluido en cuestión por un fluido motriz a alta velocidad a través de una boquilla, hasta la presión atmosférica Ver Fig. 2. Cuando se requiere más vacío, se necesitan dos, tres o cuatro etapas con condensadores intermedios. (5, 6)

Los eyectores se usan cuando se dispone de grandes cantidades de vapor o gas como fluidos motrices a bajo costo. Su uso más amplio es para producir vacío.

El funcionamiento de un eyector se basa en el flujo de un fluido a alta velocidad (presión estática baja) que produce el arrastre de otro fluido, al entrar en contacto con él, produciendo la mezcla de los fluidos.

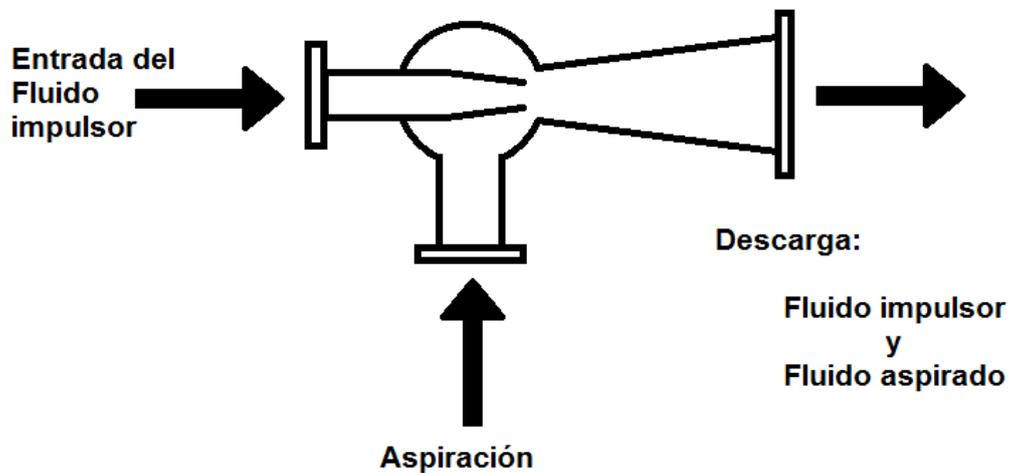


Fig. 2. Funcionamiento de un eyector.

Un eyector consta de tres partes: una boquilla, una cámara de succión y un difusor. La boquilla permite la expansión del fluido motriz a una velocidad más alta. Este flujo a alta velocidad entra en contacto con el gas a ser comprimido en la cámara de succión. La compresión del gas se produce a medida que la energía por velocidad se convierte en presión al desacelerar la mezcla a través del difusor. Ver Fig. 3.

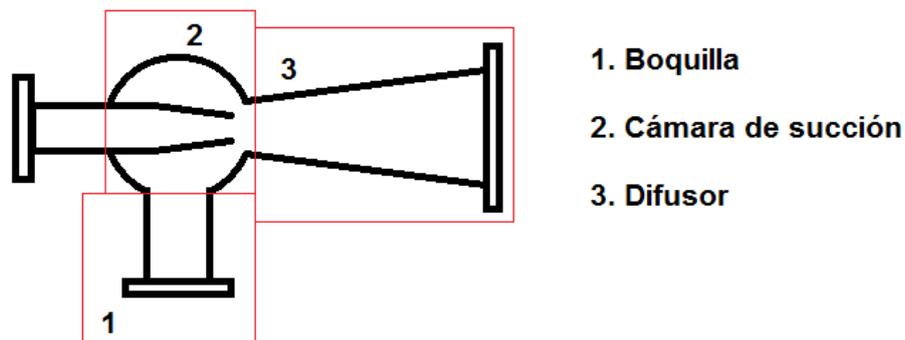


Fig. 3. Secciones de un eyector

Según la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = cte$$

Ec. 1

Dónde:

V = velocidad del fluido de la sección considerada.

$\rho$  = densidad del fluido.

P = presión a lo largo de la corriente.

g = aceleración gravitatoria.

z = altura en la dirección de atracción gravitacional.

El primer término de la ecuación es un término cinético  $\left(\frac{V^2 \rho}{2}\right)$ .

El tercer término es potencial  $(\rho g z)$ .

El término cinético domina en la zona 1 (ver Fig. 3.) y el término potencial domina la zona 3. Es por eso que al aumentar el diámetro del flujo, la presión aumenta mientras la velocidad disminuye.

### Clasificación técnica del vacío

A continuación se define la clasificación del servicio de vacío en referencia a su nivel de presión. (7)

- Bajo vacío: (LV) del inglés *low vacuum*, presión absoluta de gas en el alcance de 100 kPa a 100 Pa.
- Medio vacío: (MV) del inglés *medium vacuum*, presión absoluta de gas en el alcance de 100 Pa a 0,1 Pa.
- Alto vacío: (HV) del inglés *high vacuum*, presión absoluta de gas en el alcance de 0,1 Pa a 10  $\mu$ Pa.
- Ultra alto vacío: (UHV) del inglés *ultra high vacuum*, presión absoluta de gas menor a 10  $\mu$ Pa.

Esta clasificación se puede apreciar de manera esquemática en la Fig. 4.

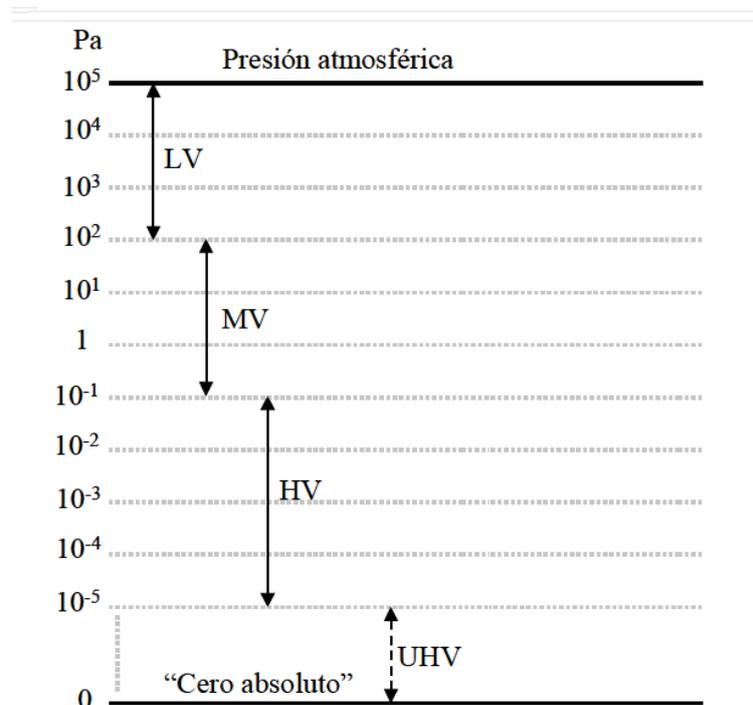


Fig.4. Clasificación técnica del vacío.

## Bomba de vacío.

**Bombas de vacío** (8): Son equipos de desplazamiento positivo del tipo rotatorio, los que generan vacíos superiores a los obtenidos con compresores reciprocantes ver Fig. 5. y centrífugos ver Fig. 6. Estos compresores rotatorios, para operar en condiciones de vacío, son diseñados para aceptar un gas a una densidad muy baja y suministrar mayores cocientes de compresión que los compresores rotatorios de altas presiones. Sin embargo, a bajas presiones absolutas el desplazamiento requerido es mayor para la misma cantidad de gas, debido al balance de energía, pues a presiones bajas el volumen es grande, por lo cual la eficiencia volumétrica es menor, la cual se aproxima a cero a muy bajas presiones absolutas.

Las bombas de vacío tienen un límite de presión de vacío que pueden alcanzar, se caracterizan por tener una eficiencia mecánica menor y por requerir mayores tamaños, para la misma cantidad de gas, que los compresores de altas presiones.

**Bomba de anillo líquido:** Es una bomba rotatoria no pulsante que comprime gases mediante un anillo líquido, usualmente agua, que es generado por un impulsor rotatorio. La única parte en movimiento es el rotor o impulsor, el cual es montado en una flecha localizada de manera excéntrica respecto al eje central de una carcasa cilíndrica o elíptica. Ver Fig. 7.

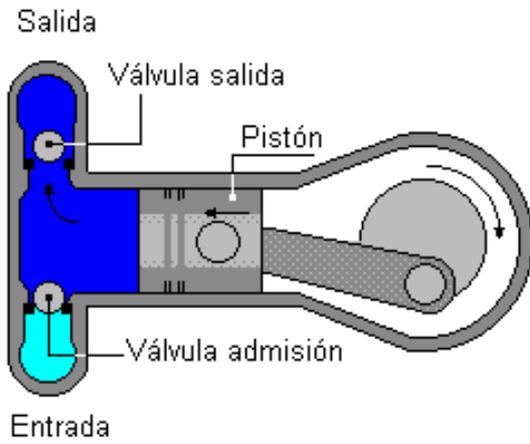


Fig. 5. Bomba reciprocante.

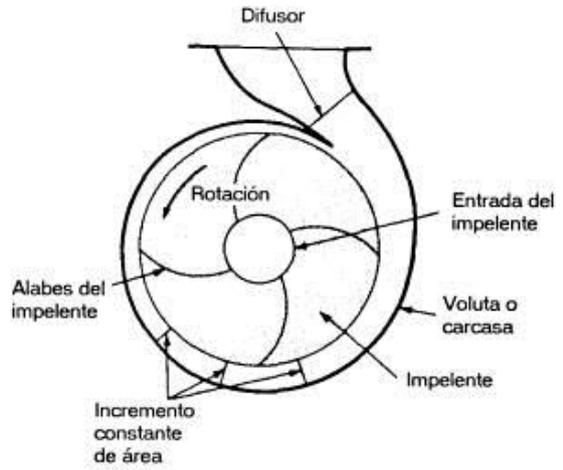


Fig. 6. Bomba centrífuga.

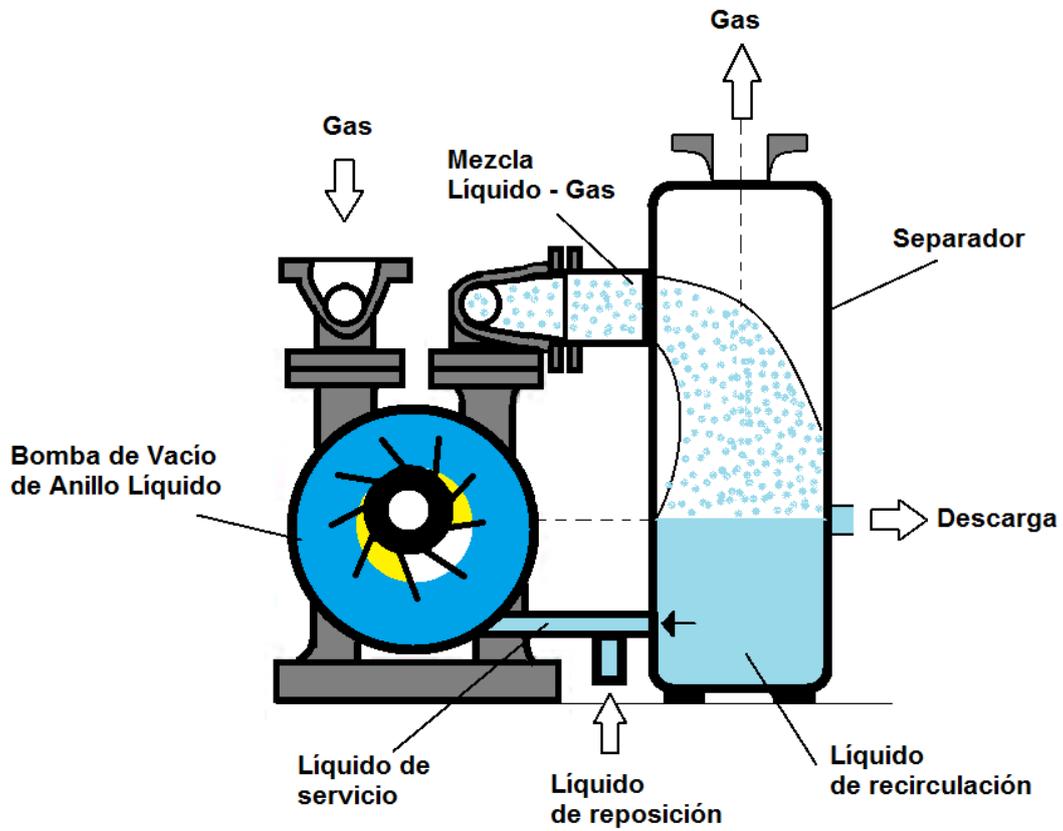


Fig. 7. Bomba de vacío de anillo líquido.

## Capítulo 2. Planteamiento del problema.

El objeto de estudio del presente trabajo es una torre de destilación al vacío que opera en una refinería mexicana, ubicada en el estado de Hidalgo.

En su diseño original la torre de destilación al vacío operaba con dos trenes de eyectores, cada tren compuesto por tres etapas. Después de un tiempo se realizaron modificaciones a estos eyectores y así las condiciones de operación de la torre cambiaron.

Se ha reportado por el grupo de proceso de la refinería que la torre de destilación bajo algunas circunstancias no opera con el vacío requerido. Debido al sobre presionamiento del cabezal de desfogue al cual se conecta la descarga del sistema de eyectores, por causas operativas fuera del control del operador de la planta de vacío. Para solucionar este inconveniente se ha propuesto acoplar una bomba de vacío de anillo líquido al final del sistema de eyectores, como ya se dijo, es objetivo del presente trabajo analizar si el equipo que se desea acoplar cumple con los requerimientos de vacío de la torre de destilación.

El objetivo principal del sistema de vacío es mantener una presión de vacío adecuada para el correcto funcionamiento de la torre de destilación. Por lo cual se desea estimar que efectos tendría la operación de la torre si la bomba de vacío de anillo líquido es capaz de garantizar el vacío requerido por esta torre en cualquier momento.

La bomba de vacío de anillo líquido se pretende acoplar en serie a la tercera etapa de compresión de los bancos de condensadores del sistema de vacío. Ver Fig. 8. Con esta modificación se asume que mejorará la capacidad de vacío de la torre, incrementando así la cantidad recuperada de productos de alto valor. Para asegurar que cumpla con las especificaciones requeridas, se realiza un análisis de sensibilidad operativa.

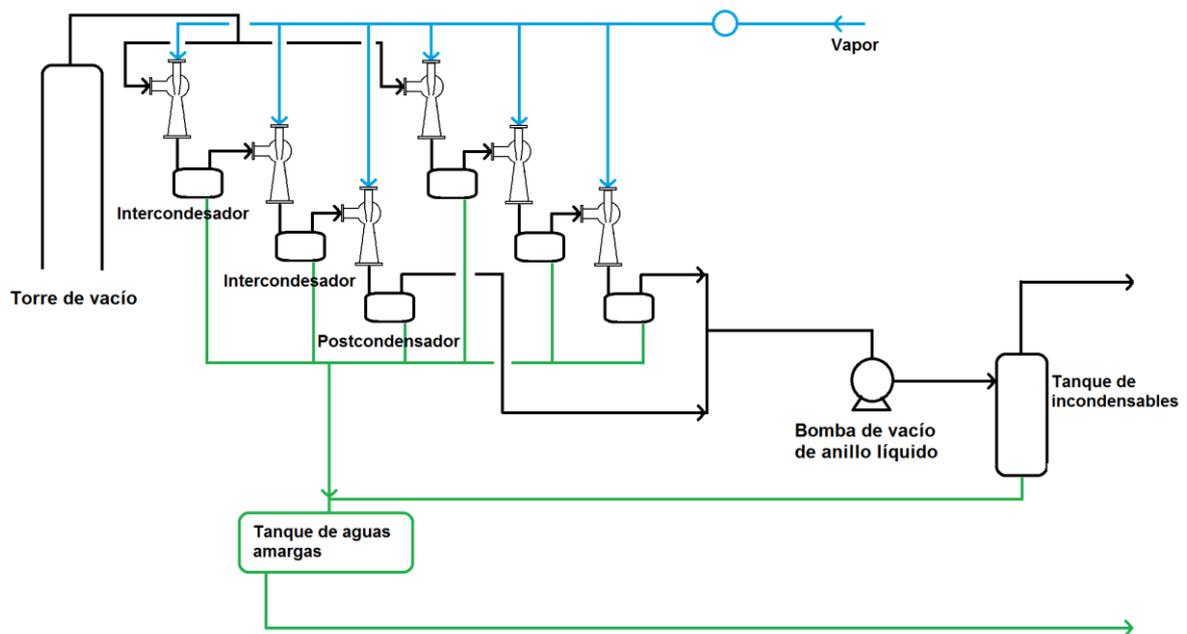


Fig. 8. Esquema del sistema de vacío.

En la Fig. 8. se presenta la disposición de la torre, así como de los condensadores y de la bomba de vacío de anillo líquido.

Se piensa que la modificación a la torre tuvo un impacto positivo en la operación de esta, sin embargo no se tiene cuantificada la mejora. Se sabe que originalmente el domo de la torre de vacío operaba a 15 mmHgabs y se desea conocer la forma en que la posible nueva presión de operación afecta al desempeño de la torre de destilación al vacío. En otras palabras, se desea saber qué ocurre en el sistema hasta la succión de la bomba.

## Descripción del sistema analizado

La unidad de Destilación al vacío del presente caso de estudio tiene como finalidad, fraccionar dos tipos de carga: crudo reducido tipo cretácico o mezcla 50/50% Vol., de crudo reducido cretácico/marino provenientes de la unidad de Destilación Primaria y de tanques de almacenamiento. (1)

Los productos que se obtienen de esta torre son: GOL, GOP y RV. Las corrientes de GOL y GOP son enviadas como carga a la planta catalítica F.C.C., o a tanques de almacenamiento para ser empleados en la producción de diesel.

El condensado aceitoso que se obtiene en el tanque de sello del sistema de vacío, se envía al sistema de tratamiento de aguas amargas de la Unidad de Destilación Atmosférica y los gases incondensables del mismo sistema de vacío, se queman en la chimenea de uno de los calentadores de carga.

Esta torre de destilación al vacío consta de cinco secciones.

1. Condensación de GOL.
2. Lavado superior.
3. Condensación de GOP.
4. Lavado inferior.
5. Agotamiento.

Cuenta con una malla eliminadora de niebla entre las secciones tres y cuatro y una línea de lavado con GOP en la parte superior de la torre, para evitar la formación de sólidos y/o depósitos de carbón en ella.

El vacío en la torre se mantenía originalmente por dos trenes de eyectores operando en paralelo. Posteriormente se instalará una bomba de vacío de anillo líquido para auxiliar al sistema de vacío a que la torre mantenga el vacío

requerido, sin embargo no se ha podido obtener información de proceso porque hasta la fecha no se ha construido esta modificación.

La alimentación de crudo reducido a la torre se efectúa por medio de dos líneas procedentes de los hornos, dichas corrientes entran a 390°C por la zona de vaporización, que opera a 30mmHgabs.

Paquete de vacío: está formado por dos trenes de eyectores operando en paralelo, cada uno cuenta con tres eyectores y tres condensadores (dos intercondensadores y un postcondensador).

Para el paquete de vacío originalmente (ver tabla 1):

Capacidad requerida	4908 kg/h
Capacidad de diseño	16677 kg/h
Presión diseño	15.82 kg/cm <sup>2</sup> man
Temperatura de diseño	270°C
Presión de operación	15 mmHgabs

Tabla 1. Especificaciones originales del paquete de vacío.

### Consideraciones para diseño

Dentro de una torre de destilación cualquiera:

- Mientras menos productos de fondo se tengan, se obtendrá una mayor eficiencia térmica.
- Si se tiene una mayor eficiencia térmica se producirá una mayor cantidad de componentes ligeros a lo largo de la torre. Esto implica que los componentes ligeros serán posiblemente más pesados de lo especificado originalmente.
- Al incrementar el vacío se tendrá un mayor flujo de productos en las tomas laterales de la torre.

- Al obtener una mayor cantidad de productos naturalmente cambia la forma de operar de la torre.

Ahora se analiza la torre de vacío:

- Una torre de vacío funciona en principio como una torre convencional, a diferencia que la presión disminuida nos ofrece ventajas ya que reduciendo la presión del sistema, la ebullición se efectúa a una menor temperatura y se elimina el riesgo de provocar la desintegración térmica.
- El vacío de la torre se manifiesta principalmente en el domo de esta.
- Un vacío constante garantiza la operación adecuada de la torre.
- Si el vacío se incrementa, la torre opera de un modo más eficiente pues esto favorece la vaporización de componentes ligeros, requiriendo una menor inversión térmica.
- Si el vacío se incrementa se puede suponer una mayor eficiencia térmica y así un mayor flujo de productos que de otro modo no se separarían del RV.

Como ya hemos dicho antes si el vacío aumenta se favorece la vaporización de componentes ligeros, por lo cual se tiene más vapor en el plato, o visto de otro modo, componentes un poco más pesados están contribuyendo al volumen de vapor en el plato, pues el vacío mayor les permite hacerlo. Desde un punto de vista económico, el vacío nos permitirá obtener productos de mejor calidad y más valiosos en el mercado. Porque al mejorar la extracción de gasóleos ligeros y pesados en la torre se estará optimizando la entrada de carga a la FCC, la cual generará gasolinas de mejor calidad (de mejor octano) lo cual representa una ganancia económica.

### Metodología de solución (9)

Supóngase que se tiene un plato cualquiera de la torre dígame un plato  $J$  ver Fig. 9. A este plato se le asigna una alimentación externa  $F_J$  que tiene una composición del componente  $i$  en la etapa  $j$   $z_{ij}$ , una entalpía  $H_{fJ}$ , una temperatura  $T_{fJ}$  y una presión  $P_{fJ}$ .

En esta etapa se tienen dos corrientes líquidas y dos corrientes de vapor que se deben considerar, una corriente de líquido y una de vapor entran al plato mientras que otra corriente de líquido y otra de vapor lo abandonan, las corrientes que salen poseen las características del plato  $J$ .

Es decir el vapor que sale del plato  $J$  se llama  $V_J$  el cual tiene una composición de vapor  $y_{iJ}$ , una temperatura  $T_J$ , una entalpía  $H_{VJ}$  y una presión  $P_J$ .

Análogamente el líquido que sale del plato  $J$  llamado  $L_J$  tiene una composición de líquido  $x_{iJ}$ , una temperatura  $T_J$ , una entalpía  $H_{LJ}$  y una presión  $P_J$ .

Para el caso de tener tomas laterales se pueden ver en cuanto a vapor como  $W_J$  y al líquido como  $U_J$ , teniendo  $W_J$  las mismas propiedades que  $V_J$ , análogamente  $U_J$  con  $L_J$ .

Para las corrientes de líquido y vapor que entran se considerará que el vapor que entra se llama  $V_{J+1}$  el cual tiene una composición de vapor  $y_{iJ+1}$ , una temperatura  $T_{J+1}$ , una entalpía  $H_{VJ+1}$  y una presión  $P_{J+1}$ . Asimismo el líquido que sale del plato  $J$  llamado  $L_{J-1}$  tiene una composición de líquido  $x_{iJ-1}$ , una temperatura  $T_{J-1}$ , una entalpía  $H_{LJ-1}$  y una presión  $P_{J-1}$ .

El calor transferido en ese plato J se llamará  $Q_J$  este puede entrar o salir del sistema.

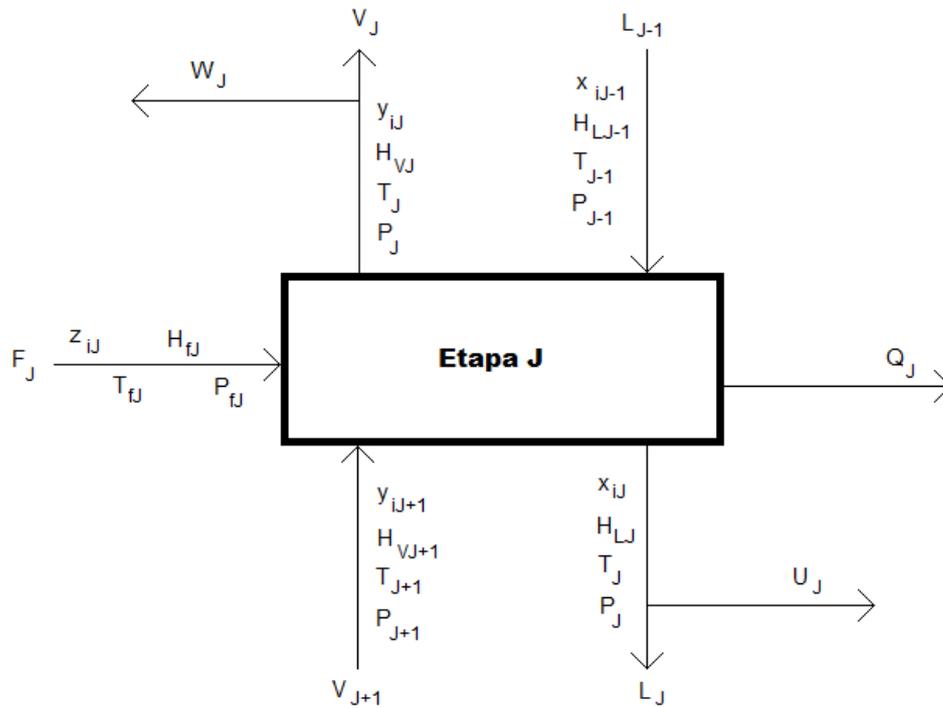


Fig. 9. Explicación de una etapa de destilación.

Balances a considerar en una torre de destilación multicomponente

Ecuaciones MESH

Balance de materia ( $M_{iJ}$ ).

Ec. 2

$$L_{J-1}x_{j-1} + V_{J+1}y_{J+1} + F_Jz_{iJ} - (L_J + U_J)x_{iJ} - (V_J + W_J)y_{iJ} = 0$$

Relación de equilibrio ( $E_{iJ}$ ).

Ec. 3

$$y_{iJ} = k_{iJ}x_{iJ}$$

Suma de fracciones mol ( $S_{i,j}$ ).

$$\sum_{i=1}^c y_{ij} = 1 \quad \text{Ec. 4}$$

$$\sum_{i=1}^c x_{ij} = 1 \quad \text{Ec. 5}$$

Balance de energía (H).

$$L_{J-1}H_{LJ-1} + V_{J+1}H_{VJ+1} + F_JH_{FJ} - (L_J + U_J)H_{LJ} - (V_J + W_J)H_{VJ} - Q = 0 \quad \text{Ec. 6}$$

Ecuación auxiliar 1. Balance desde la alimentación al Fondo.

$$L_J = V_{J+1} + \sum_{m=1}^J (F_m - U_m - W_m) - V_1 \quad \text{Ec. 7}$$

Ecuación auxiliar 2. Balance desde la alimentación al Domo.

$$L_{J-1} = V_J + \sum_{m=1}^{J-1} (F_m - U_m - W_m) - V_1 \quad \text{Ec. 8}$$

Ver Fig. 10.

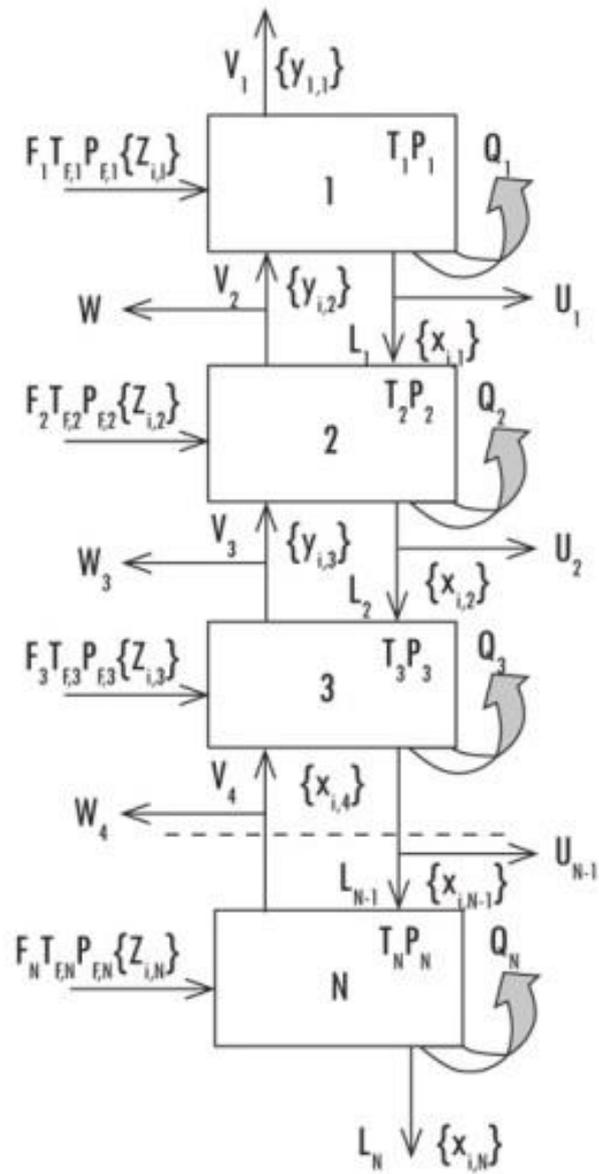


Fig. 10. Representación del balance MESH de una torre de destilación.

Al sustituir las ecuaciones 7 y 8 en la ecuación 2 se llega a establecer la matriz tridiagonal dada por la siguiente ecuación:

Matriz tridiagonal.

$$A_{J-1}x_{iJ} + B_Jx_{iJ} + C_Jx_{iJ+1} = D_J \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

$$A_J = V_{J+1} + \sum_{m=1}^{J-1} (F_m - U_m - W_m) - V_1 \quad 2 \leq J \leq N \quad \text{Ec. 10}$$

$$B_J = -[V_{J+1} + \sum_{m=1}^J (F_m - U_m - W_m) - V_1 + U_J + (V_J + W_J)k_{iJ}] \quad 1 \leq J < N \quad \text{Ec. 11}$$

$$C_J = V_{J+1}k_{iJ+1} \quad 1 \leq J \leq N - 1 \quad \text{Ec. 12}$$

$$D_J = -F_Jz_{iJ} \quad 1 \leq J \leq N \quad \text{Ec. 13}$$

La ecuación 9 es de índole matricial de características tridiagonales que permite obtener la composición del componente i en cada una de las etapas que constituyen a la torre.

La matriz lucirá de esta forma:

$$\begin{bmatrix} B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_3 & B_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_4 & B_4 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_5 & B_5 & C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_6 & B_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i,1} \\ x_{i,2} \\ x_{i,3} \\ x_{i,4} \\ x_{i,5} \\ x_{i,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 14}$$

Por lo cual la solución es del tipo:

$$[x_{iJ}] = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_N \end{bmatrix} [AB]^{-1} \quad \text{Ec. 15}$$

Recordemos que esta solución únicamente nos da el balance de materia. Para el balance de energía recordemos la ecuación 6.

$$L_{J-1}H_{LJ-1} + V_{J+1}H_{VJ+1} + F_J H_{FJ} - (L_J + U_J)H_{LJ} - (V_J + W_J)H_{VJ} - Q_J = 0 \quad \boxed{\text{Ec. 16}}$$

De igual manera sustituimos la ecuación 7 y la 8 en la 6 para obtener la siguiente relación que llamaremos ecuación 17:

$$\alpha_J V_J + \beta_J V_{J+1} = \gamma_J \quad \boxed{\text{Ec. 17}}$$

Dónde:

$$\alpha_J = (H_{LJ-1} - H_{VJ}) \quad \boxed{\text{Ec. 18}}$$

$$\beta_J = (H_{VJ+1} - H_{LJ}) \quad \boxed{\text{Ec. 19}}$$

$$\begin{aligned} \gamma_J = & [\sum_{m=1}^{J-1} (F_m - U_m - W_m) - V_1](H_{LJ} - H_{LJ-1}) \\ & + F_J(H_{LJ} - H_{FJ}) + W_J(H_{VJ} - H_{LJ}) + Q_J \end{aligned} \quad \boxed{\text{Ec. 20}}$$

### Algoritmo para estimar el comportamiento de una columna de destilación multicomponente

1. Especificar todas las condiciones de alimentación.  $F_J, z_{ij}, H_f, T_f$  y  $P_f$ .
2. Especificar condiciones de operación  $V_1$  (producto destilado) y reflujo.
3. Suponer el perfil de temperatura y el perfil de vapor,  $T_J$  (esta es la temperatura de ebullición a las condiciones del plato en cuestión) y  $V_J$  respectivamente.
4. Resolver el balance de materia  $x_{iJ}$  como se ha explicado previamente.
5. Calcular los nuevos valores de temperatura en cada etapa asumiendo que en cada plato, el líquido se encuentra en su temperatura de burbuja, para esto es necesario ocupar el criterio de la ecuación de punto de burbuja:

$$\sum_{i=1}^C k_{iJ} x_{iJ} - 1 = 0 \quad \boxed{\text{Ec. 21}}$$

Dado que los valores que se tienen para el presente caso difícilmente presentan una composición constante a lo largo de la operación de la

torre, se admitirá un error máximo de 5% en la suma de composiciones.  
Es decir:

$$\sum_{i=1}^C k_{ij} x_{ij} - 0.95 \leq 0.05 \quad \text{Ec. 22}$$

Este paso es una iteración dentro de la iteración total. No se debe avanzar hasta que se haya cumplido esta condición en cada uno de las etapas que conforman la columna.

6. Calcular  $k_{ij}$  nuevas con la temperatura de burbuja antes estimada. Todo esto para evaluar la composición de vapores que se desprenden en cada etapa.

$$y_{ij} = k_{ij} T_{eb} x_{ij} \quad \text{Ec. 23}$$

7. Estimar el flujo de líquido y de vapor que se desprenden de cada una de las etapas.

$$L_J = V_{J+1} + \sum_{m=1}^J (F_m - U_m - W_m) - V_1 \quad \text{Ec. 24}$$

$$V_J = \frac{\gamma_{J-1} - \alpha_{J-1} V_{J-1}}{\beta_{J-1}} \quad \text{Ec. 25}$$

8. Estimar el servicio de enfriamiento y de calentamiento necesarios en el condensador y el rehervidor.

a) Condensador (Balance de energía).

$$L_{J-1} H_{LJ-1} + V_{J+1} H_{VJ+1} + F_J H_{FJ} - (L_J + U_J) H_{LJ} - (V_J + W_J) H_{VJ} - Q_J = 0 \quad \text{Ec. 26}$$

El resultado de esta ecuación naturalmente debe ser un valor negativo.

b) Rehervidor

El calor que se requiere en el rehervidor será la suma de los calores que se requieren en cada una de las etapas para mantenerlas en su temperatura de ebullición. Esto se obtiene del siguiente balance de energía:

$$Q_N = \sum_{j=1}^N (F_j H_{Fj} - U_j H_{Lj} - W_j H_{Vj}) - \sum_{j=1}^N Q_j - V_1 H_{V1} - L_N H_{LN} \quad \text{Ec. 27}$$

9. Verificar convergencia

Para calcular la convergencia se recurre al siguiente criterio:

$$\tau = \sum_{j=1}^N (T_j^K - T_j^{K-1})^2 \quad \text{Ec. 28}$$

Que se basa en el criterio de mínimos cuadrados. De tal suerte que:

Si

$$\tau \leq 0.01 N \quad \text{Se acepta el valor obtenido}$$

$$\tau > 0.01 N \quad \text{Se debe regresar al inciso 3}$$

Una vez que se tiene la solución de composiciones y temperaturas en cada plato de la torre se emplea la información correspondiente al domo de la torre exclusivamente. Con estos valores de flujo y temperatura se usará la ecuación del gas ideal y así se conocerá la presión en el domo de la torre. A continuación se explica el algoritmo:(10)

$$PV = nRT \quad \text{Ec. 29}$$

Por definición

$$n = M/PM \quad \text{Ec. 30}$$

Sustituyendo la ecuación 30 en la 29 y reacomodando obtenemos la siguiente:

$$P = \frac{M RT}{V PM} \quad \text{Ec. 31}$$

Por definición:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{Ec. 32}$$

Al sustituir la ecuación 32 en la 31 se obtiene la siguiente ecuación:

$$P = \rho \frac{RT}{PM}$$

Ec. 33

Con esta última ecuación 33 se conoce la presión a partir de la densidad de la muestra que según el manual de operación es de 24.47 grados API.

Dado que resolver esta torre manualmente es un trabajo prácticamente imposible por cuestiones de inversión de tiempo y recursos, así como escases de datos, se ha optado por resolver esta torre empleando el programa Aspen TECH. Aspen Hysys V7.3 (11).

## Capítulo 3. Desarrollo

### Algoritmo de simulación

Primero que nada al abrir el caso nuevo del programa simulador Aspen Hysys V7.3 se elige un paquete termodinámico, en este trabajo se emplea la ecuación de estado de Peng-Robinson. (12)

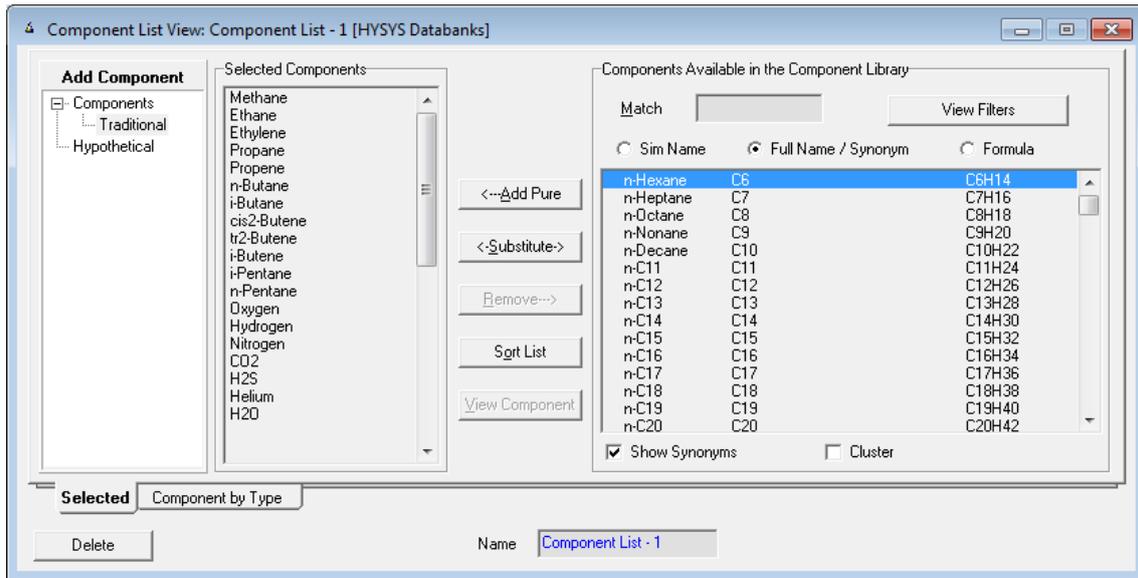
El modelo de Peng Robinson es ideal para cálculos de equilibrio líquido-vapor para sistemas de hidrocarburos. El paquete de propiedades PR resuelve rigurosamente una, dos o tres fases con un alto grado de eficiencia y confiabilidad y se aplica en un rango amplio de condiciones.

ASPENTech ha propuesto una guía para la selección de los paquetes de propiedades según el tipo de compuestos y las condiciones operativas. En el cual para Torre de destilación al vacío se recomienda el paquete termodinámico PR Ver Tabla 2. (13)

<b>Tipo de Proceso</b>	<b>Paquete Termodinámico recomendado</b>
Deshidratación de TEG	PR
Acuosos ácido	Sour PR
Procesamiento de gas criogénico	PR, PRSV
Separación de aire	PR, PRSV
Torres atmosféricas de crudo	PR y sus variantes, Grayson Streed (GS)
Torres a vacío	PR y sus variantes, GS, Braun K10, Esso
Torres de etileno	Lee Kesler Plocker
Sistemas con alto contenido de H <sub>2</sub>	PR, Zudkevitch-Joffe (ZJ), GS
Reservorios	PR y sus variantes
Sistemas de vapor	ASME Steam, Chao Seader, GS
Inhibición de hidratos	PR
Productos químicos	Modelos de actividad, PRSV
Alquilación de HF	PRSV, NRTL
Hidrocarburos-agua (alta solubilidad del agua en HC)	Kabadi Danner
Separaciones de hidrocarburos	PR, SRK
Aromáticos	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Hidrocarburos sustituidos (cloruro de vinilo, acrilonitrilo)	PR, SRK
Producción de éter (MTBE, ETBE, ter-amilmetileter TAME)	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Plantas de etilbenceno / estireno	PR, SRK o Wilson, NRTL, UNIQUAC (según la tecnología de producción)
Producción de ácido tereftálico	Wilson, NRTL, UNIQUAC
Planta de amoníaco	PR, SRK

Tabla 2. Recomendaciones de selección de paquete termodinámico.

En la pestaña de componentes se eligen los componentes que se conoce existen en la torre, los cuales se pueden apreciar en la Fig. 11



: Fig. 11. Componentes de la simulación.

Posteriormente se entra a la pestaña Oil Environment para introducir los 3 ensayos que fueron proporcionados por la refinería donde opera la torre de destilación al vacío. Los pseudocomponentes generados por el simulador serán nombrados en su totalidad como NBP seguido por tres numerales, e.d. NBP238, NBP495, etc.

Cada ensayo fue una destilación ASTM D-1160, además se conoce la densidad.

Existe un ensayo para el Gasóleo Ligero de Vacío (GOL), uno para el Gasóleo Pesado de Vacío (GOP) y uno para el Residuo de Vacío (RV).

Empleando los 3 ensayos se genera una corriente para cada uno con el flujo dado por la refinería como dato de campo.

Al entrar en el ambiente de simulación ya existen estas 3 corrientes que se generaron. La cuarta corriente corresponde a un estudio estadístico de los vapores del domo de la torre.

Existen 4 corrientes correspondientes a las salidas de la torre de destilación al vacío. Sus propiedades se pueden ver en la Tabla 3:

	RV ASTM1160	GOP ASTM1160	GOL ASTM1160	Estadístico Domo
Vapor	0.00	0.00	0.00	1.00
Temp °C	350.00	239.00	140.00	60.00
Pres mmHg abs	28.99	4413.36	10297.83	15.00
Flujo BPD	51431.00	7631.00	16403.00	4032.08

Tabla 3. Condiciones de operación de las corrientes de salida laterales de la torre de destilación al vacío.

La mezcla de estas cuatro corrientes se adecúa a los requerimientos de campo para tener la alimentación de la torre según la Tabla 4:

	Alimentación
Vapor	0.633
Temp °C	390
Pres mmHg man	180.5
Flujo BPD	79497

Tabla 4. Condiciones de operación de la corrientes de salida del domo de la torre de destilación al vacío.

Ya que se tiene la corriente de alimentación se procede a resolver la torre de destilación al vacío Ver Fig.12.

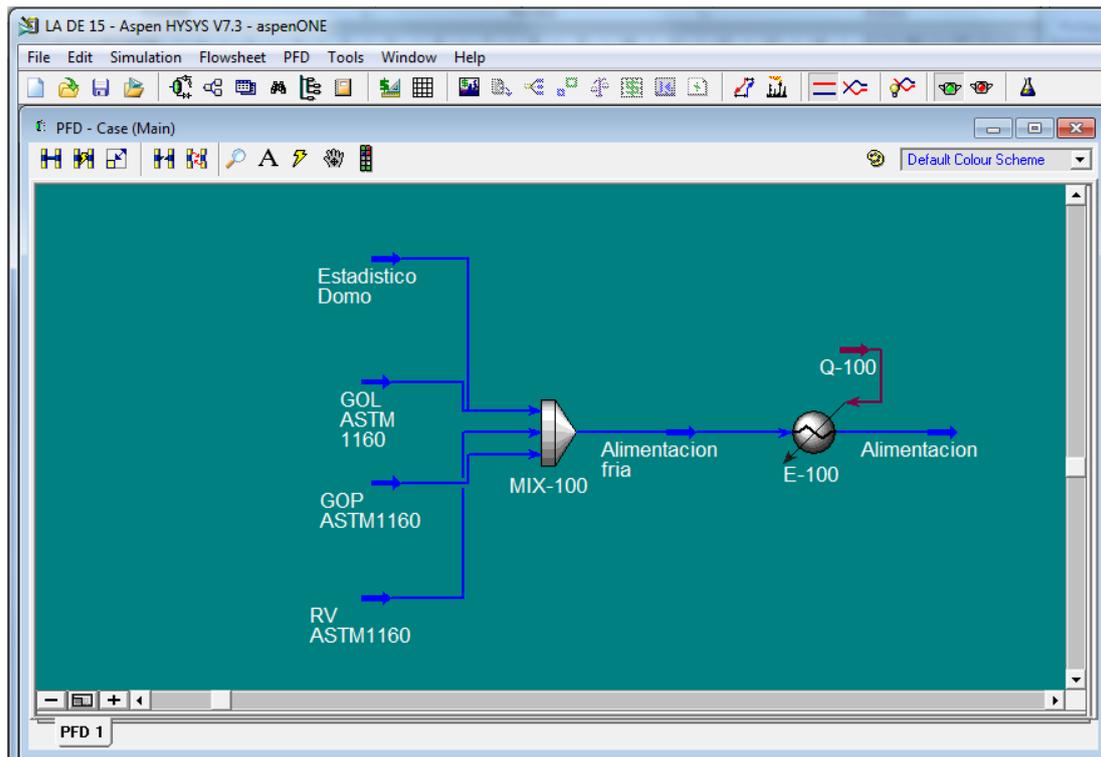


Fig. 12. Corriente de alimentación resultante.

Resolviendo la torre de destilación al vacío del caso de estudio:

La torre de destilación consta de 5 secciones

- |  |          |
|--|----------|
| 1. Condensación de gasóleo ligero (GOL): | 4 platos |
| 2. Lavado superior:                      | 2 platos |
| 3. Condensación de gasóleo pesado (GOP)  | 4 platos |
| 4. Lavado inferior                       | 2 platos |
| 5. Agotamiento                           | 4 platos |

Lo cual suma un total de 16 platos.

Los datos disponibles para esta torre son los siguientes:

Temperaturas
Temperatura en el domo: 60°C
Temperatura en el fondo: 366°C
Temperatura de alimentación principal (plato 13): 390°C
Temperatura alimentación de GOL (plato 1): 57°C
Temperatura de alimentación de GOP (plato 7): 175°C
Temperatura de alimentación de Residuo (plato 15): 360°C

Tabla 5. Temperaturas conocidas de la operación de la torre.

Presiones
Presión del domo: 15 mmHg abs
Presión del fondo: 30 mmHg abs

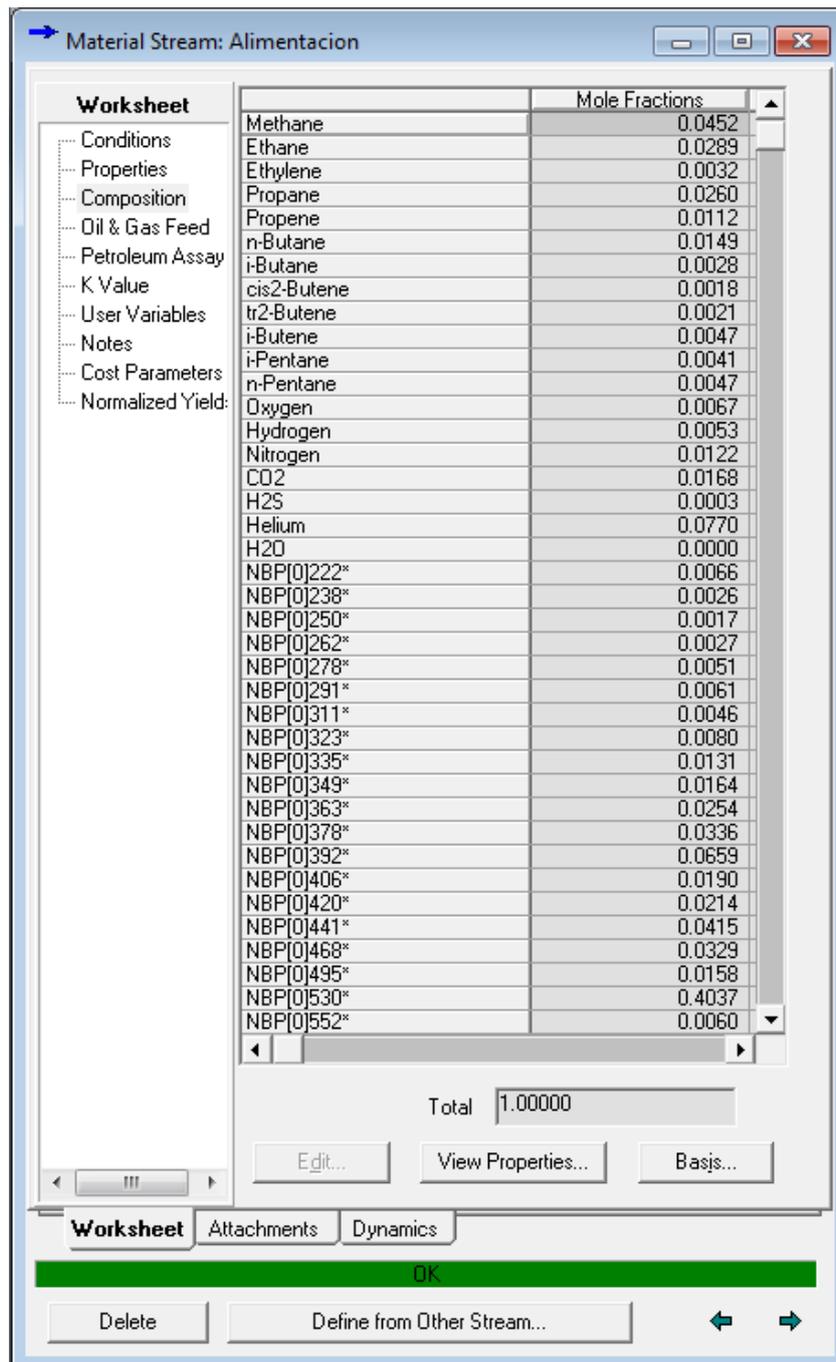
Tabla 6. Presiones conocidas de la operación de la torre.

Flujos de entrada	Flujos de salida
Plato 13: 79497 BPD	Plato 4: 16403 BPD
	Plato 10: 7631 BPD
	Plato 16: 51431 BPD

Tabla 7. Flujos conocidos de la operación de la torre.

## Composiciones

Dado que no hay datos de la composición de entrada, pero sí de las composiciones de salida, la composición empleada como alimentación a la torre es la corriente resultante de la mezcla de cada una de las corrientes disponibles a la salida de la torre ver Fig. 13, posteriormente se verificó que está alimentación funciona correctamente:



The screenshot shows a software window titled "Material Stream: Alimentacion" with a "Worksheet" tab selected. The window displays a table of chemical components and their mole fractions. The total mole fraction is 1.00000. The components listed are:

Component	Mole Fractions
Methane	0.0452
Ethane	0.0289
Ethylene	0.0032
Propane	0.0260
Propene	0.0112
n-Butane	0.0149
i-Butane	0.0028
cis-2-Butene	0.0018
tr-2-Butene	0.0021
i-Butene	0.0047
i-Pentane	0.0041
n-Pentane	0.0047
Oxygen	0.0067
Hydrogen	0.0053
Nitrogen	0.0122
CO2	0.0168
H2S	0.0003
Helium	0.0770
H2O	0.0000
NBP[0]222*	0.0066
NBP[0]238*	0.0026
NBP[0]250*	0.0017
NBP[0]262*	0.0027
NBP[0]278*	0.0051
NBP[0]291*	0.0061
NBP[0]311*	0.0046
NBP[0]323*	0.0080
NBP[0]335*	0.0131
NBP[0]349*	0.0164
NBP[0]363*	0.0254
NBP[0]378*	0.0336
NBP[0]392*	0.0659
NBP[0]406*	0.0190
NBP[0]420*	0.0214
NBP[0]441*	0.0415
NBP[0]468*	0.0329
NBP[0]495*	0.0158
NBP[0]530*	0.4037
NBP[0]552*	0.0060

Total: 1.00000

Fig. 13. Alimentación resultante de alimentación a la torre.

Dado que la presión del fondo de la torre es de 30 mmHg abs y la del domo es 15 mmHg abs. Se asume que el perfil presiones se comporta linealmente.

La alimentación de crudo reducido a la torre se efectúa por medio de dos líneas procedentes de los hornos, dichas corrientes entran a 390°C por la zona de vaporización, que opera a 30mmHg abs.

Por medio de recirculación del residuo de la destilación, en el fondo de la torre, se mantiene a 366°C. Ver Fig. 14.

La alimentación de crudo reducido se introduce a la torre en el plato 13 a 390°C.

Existen dos salidas laterales. La primera maneja GOL que sale del plato 4 y se divide en tres, la primera parte se va a la Planta FCC, la segunda regresa a la torre por el plato 1 y la tercera regresa a la torre al plato 5.

La segunda toma lateral maneja GOP que sale del plato 10 y al igual que el GOL se divide en tres, la primer parte se manda de igual modo a la Planta FCC, la segunda parte se regresa a la torre por el plato 7 y la tercera se regresa a la torre en el plato 11.

Hasta el fondo de la torre se obtiene un residuo de vacío que se recircula en parte al plato 16. El resto se va a almacenamiento. Como no se dispone de información referente a esta recirculación se realizó un análisis de sensibilidad para determinar el mejor valor para esta corriente.

Todo lo descrito anteriormente se puede observar en la Fig. 14. Esquema de corrientes de la torre.

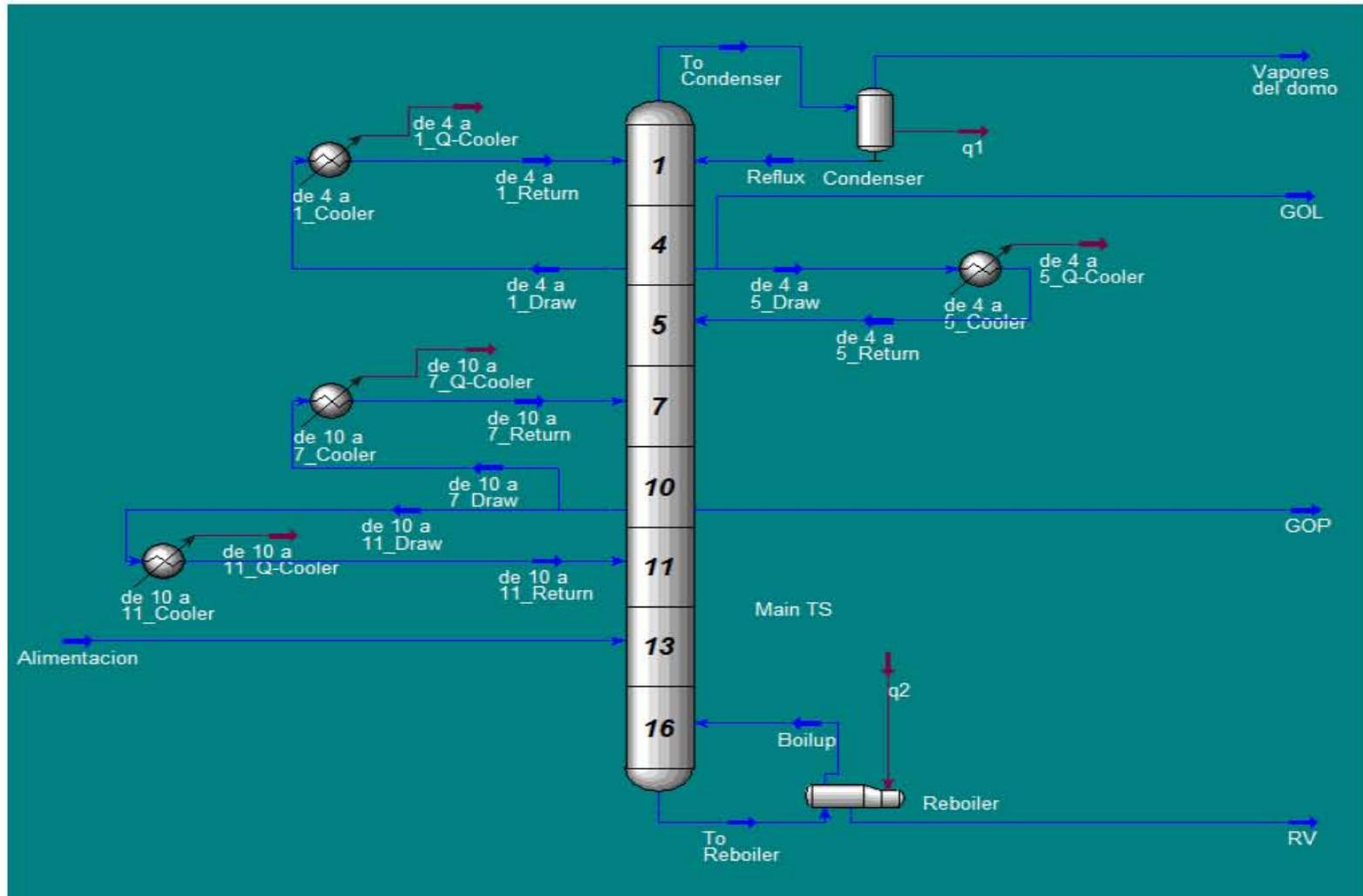


Fig. 14. Esquema de corrientes de la torre.

La presente torre de destilación presenta 12 grados de libertad para poder resolverse.

Para resolver la torre se emplean los siguientes datos:

1. La corriente de alimentación se debe definir completamente, su temperatura es de 390°C y su presión de 108.5 mmHg man, su composición fue presentada en la tabla 8, anteriormente.
2. Se elige la opción de torre de destilación con rehervidor y condensador.
3. Se crea una torre de 16 platos cuya alimentación sea en el plato 13.
4. Se elige un condensador a reflujo total, ya que en el domo únicamente se obtiene vapor.
5. Por el domo se obtiene una corriente de vapor y por el fondo se obtiene el residuo de vacío (RV).
6. Las tomas laterales planteadas son dos: El GOL que se saca del plato 4 y el GOP proveniente del plato 10.
7. Se elige un rehervidor regular de Hysys.
8. La presión del condensador es del 15 mmHg abs.
9. La presión del rehervidor es de 30 mmHg abs.
10. La temperatura de la etapa superior se estima en 60°C.
11. La temperatura del rehervidor se estima en 366°C.
12. Por balance de materia se sabe que el domo debe tener un flujo de vapor de 4032 BPD.

Dado que la torre posee 4 recirculaciones, cada una con 2 grados de libertad se plantean según la Tabla 8:

Recirculaciones

Plato de extracción	Plato de retorno	Flujo BPD	Temperatura de retorno °C
4	1	42340	57
4	5	6400	154
10	7	14489	175
10	11	8712	289

Tabla 8. Condiciones de las recirculaciones de la torre.

Así pues los doce grados de libertad quedan especificados del siguiente modo ver Fig. 15.

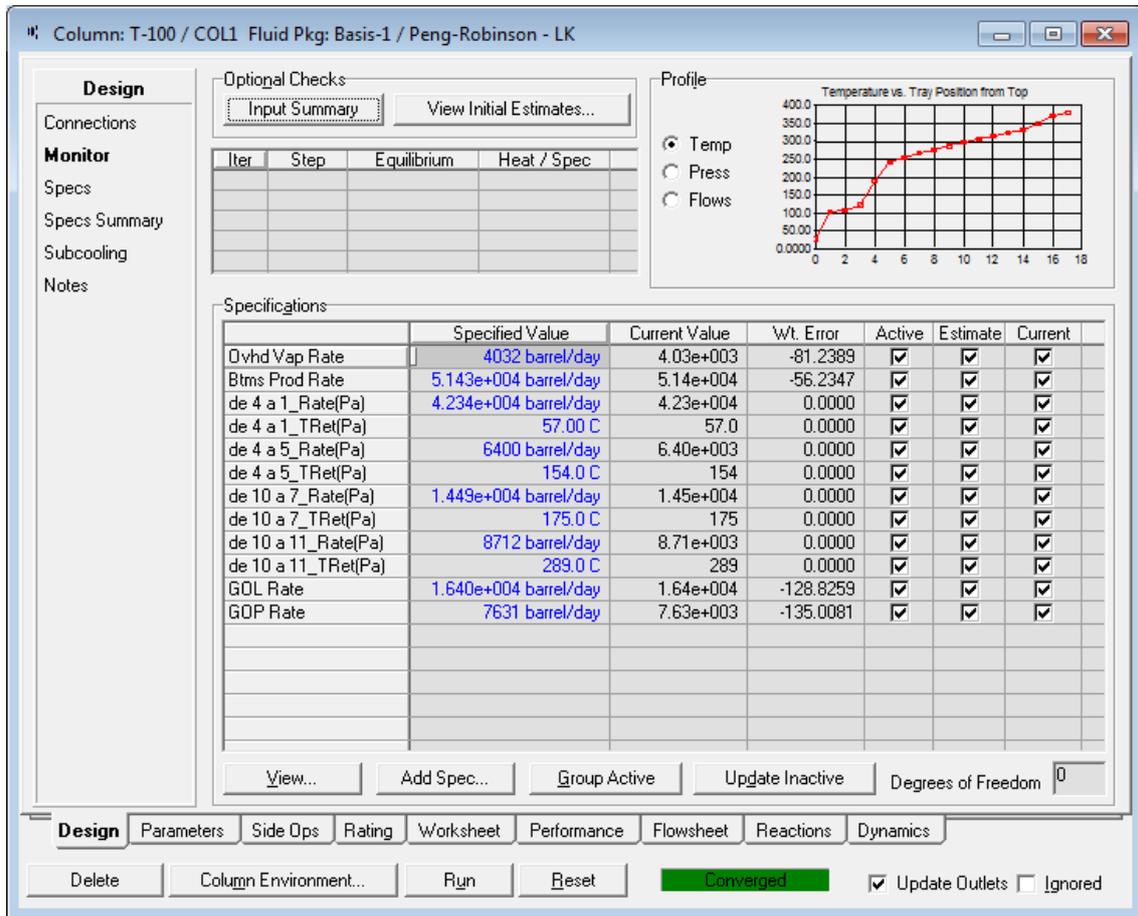


Fig. 15. Especificaciones de los grados de libertad de la torre.

Todos los datos empleados para resolver la torre corresponden con datos de campo obtenidos directamente de la refinería donde opera esta torre de destilación al vacío.

### Validación de la simulación

Para poder decir que la torre simulada corresponde con la torre real se realiza una comparación entre los valores obtenidos de la simulación y los valores obtenidos de campo. Se comparan flujos, temperaturas y composiciones, las cargas térmicas del enfriamiento y calentamiento se comparan para saber si la torre en general adquiere energía o la cede.

Para calcular el error se emplea la siguiente relación:

$$Error = Ln \frac{\text{valor simulación}}{\text{valor de campo}}$$

Ec. 34

El criterio empleado es el siguiente:

$$|Error| \leq 0.05 \quad \text{Aceptable}$$

### Simulación del sistema de vacío

La corriente que se obtiene del domo de la torre de vacío es la que se usará en esta parte.

Primero que nada se divide la corriente en dos partes iguales. Cada una de las cuales recorre un proceso igual.

El sistema cuenta con dos trenes en paralelo de tres eyectores en serie cada uno. Los eyectores se alimentan con vapor de agua a 201°C y 11629 mmHg abs. El primer eyector con 1601 BPD, el segundo con 460.6 BPD y el tercero con 460.6 BPD.

Entra la corriente al primer eyector donde se mezcla con la corriente de vapor, la corriente de salida del eyector entra a un condensador que tiene salida de líquido y vapor. El condensador trabaja con 168000 BPD de agua de enfriamiento a 32.22 °C y 4897 mmHg abs.

La corriente líquida del condensador se manda al tanque VFA3 y la corriente de vapor se alimenta al segundo eyector.

Entra la corriente al segundo eyector donde se mezcla con la corriente de vapor, la corriente de salida del eyector entra a un condensador que tiene salida de líquido y vapor. El condensador trabaja con 31371 BPD de agua de enfriamiento a 32.22 °C y 4897 mmHg abs.

La corriente líquida del condensador se manda al tanque VFA3 y la corriente de vapor se alimenta al tercer eyector.

Entra la corriente al tercer eyector donde se mezcla con la corriente de vapor, la corriente de salida del eyector entra a un condensador que tiene salida de líquido y vapor. El condensador trabaja con 23486 BPD de agua de enfriamiento a 32.22 °C y 4897 mmHg abs.

La corriente líquida del condensador se manda al tanque VFA3 y la corriente de vapor se alimenta al tanque VFA2.

Del VFA2 la corriente condensada se manda al VFA3 y la corriente gaseosa se manda a la Planta FCC.

Del VFA3 se obtiene una cantidad despreciable de vapor y la corriente líquida que se obtiene se manda a tratamiento de aguas amargas.

#### Análisis del comportamiento de la salida del domo contra la presión en el domo de la torre

Posteriormente se realizaron 5 simulaciones más, cada una con una presión en el domo menor en 1mmHg. Una simulación para 14 mmHg abs en el domo. Una simulación para 13 mmHg abs en el domo. Una simulación para 12 mmHg abs en el domo. Una simulación para 11 mmHg abs en el domo. Una simulación para 10 mmHg abs en el domo.

La finalidad de realizar esta serie de simulaciones es para poder tener un estimado de que pasaría si la bomba de vacío reduce la presión en el domo a estas condiciones.

### Efectos de la presión sobre la composición de las salidas de la torre

Se realiza un análisis de las composiciones de las diferentes salidas de la torre y se compara el comportamiento de los componentes clave de cada una.

Posteriormente se deduce a donde se encuentran los componentes en la torre dependiendo de la presión de operación y las posibles razones de porque pasa esto.

Finalmente se analiza la composición de los tanques VFA2 y VFA3 con respecto a la presión de operación del domo de la torre.

## Capítulo 4. Resultados

A continuación se presenta la Tabla 9 que es una comparativa entre los resultados de la simulación y los datos de campo:

	Temp °C		Flujo BPD		
Corriente	simulación	campo	simulación	campo	Error
Domo	28.27*	60	4032.44	4032	0.000109
GOL	181.02	140	16398.78	16403	-0.000256
GOP	289.13	239	7629.84	7631	-0.000151
RV	357.77	360	51436.00	51431	9.73E-05

Tabla 9. Tabla comparativa de temperaturas y flujos de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.

\*El domo de la torre real no cuenta con un condensador propiamente, se enfría por contacto con el medio ambiente, la temperatura del plato 1 en la simulación es de 101.82°C y si tenemos 28.27°C en el condensador aproximadamente tendríamos los 60°C requeridos.

Las temperaturas no deben alarmar puesto que la simulación está hecha con pseudocomponentes y esto implica que no representan fielmente a los componentes reales, son solo una estimación. Sin embargo los flujos son altamente relevantes pues cualquier exceso terminará en quemadores, desperdiándose.

La corriente más importante para el presente trabajo es el vapor del domo pues de ella depende el análisis de la operación del sistema de vacío. Se comprobó su similitud entre los datos obtenidos de campo y los datos obtenidos de simulación. Ver Tabla 10.

Componente	Domo simulación kgmol/h	Domo campo kgmol/h	Error
Metano	71.80	71.80	-5.06E-05
Etano	45.88	45.89	-9.81E-05
Etileno	5.02	5.02	-8.33E-05
Propano	41.27	41.28	-1.61E-04
Propeno	17.82	17.82	-1.50E-04
N-butano	23.63	23.64	-2.68E-04
I-butano	4.40	4.40	-2.35E-04
Cis2-buteno	2.84	2.84	-2.80E-04
Tr2-buteno	3.34	3.35	-2.63E-04
I-buteno	7.42	7.42	-2.46E-04
I-pentano	6.50	6.51	-4.01E-04
N-pentano	7.43	7.43	-4.35E-04
Oxígeno	10.56	10.56	-4.33E-05
Hidrógeno	8.46	8.46	-2.38E-05
Nitrógeno	19.32	19.32	-2.98E-05
CO2	26.67	26.67	-7.06E-05
H2S	0.49	0.49	-1.32E-04
He	122.31	122.31	-4.53E-05
NBP222	6.08	0.00	---

Tabla 10. Tabla comparativa de flujos molares del domo de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.

En la corriente de salida de GOL se aprecia que los componentes que son resultado de la simulación y los componentes reportados de campo son muy similares Ver Tabla 11. Lo cual es favorable pues esta corriente será quien cederá componentes a los vapores del domo.

Componente	GOL simulación kgmol/h	GOL campo kgmol/h	Error
NBP222	4.41	4.15	6.03E-02
NBP238	3.88	4.15	-6.77E-02
NBP250	2.68	2.71	-1.10E-02
NBP262	4.23	4.06	4.09E-02
NBP278	8.06	5.92	3.10E-01
NBP291	9.54	7.81	2.00E-01
NBP311	7.24	4.99	3.73E-01
NBP323	12.50	9.98	2.25E-01
NBP335	20.44	13.70	4.00E-01
NBP349	25.32	22.27	1.28E-01
NBP363	38.94	34.19	1.30E-01
NBP378	50.80	36.74	3.24E-01
NBP392	96.98	67.10	3.68E-01
NBP406	25.90	26.41	-1.97E-02
NBP420	19.35	30.27	-4.47E-01
NBP441	3.02	4.62	-4.27E-01
NBP468	0.04	1.25	-3.50E+00
NBP495	0.00	9.63	-1.07E+01

Tabla 11. Tabla comparativa de flujos molares del GOL de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.

Los flujos molares por componente de GOP ver Tabla 12. Como se puede apreciar corresponden según nuestro criterio. Por lo cual la corriente es aceptada.

Componente	GOP simulación kgmol/h	GOP análisis kgmol/h	Error
NBP262	0.16	0.19	-1.92E-01
NBP278	1.82	2.20	-1.92E-01
NBP291	1.49	1.81	-1.92E-01
NBP311	1.93	2.34	-1.92E-01
NBP323	2.23	2.70	-1.92E-01
NBP335	5.87	7.12	-1.92E-01
NBP349	11.30	13.69	-1.92E-01
NBP363	16.25	19.69	-1.92E-01
NBP378	22.56	27.34	-1.92E-01
NBP392	62.28	75.48	-1.92E-01

Tabla 12. Tabla comparativa de composiciones del GOP de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.

Como podemos observar en la Tabla 13. Los flujos molares de cada componente de GOP en su mayoría son muy similares y cumplen el criterio de tolerancia, por lo cual podemos decir que esta corriente es correcta pues la única corriente que no cumple con el criterio de tolerancia es despreciable con respecto a la corriente del componente principal.

Componente	RV simulación kgmol/h	RV análisis kgmol/h	Error
NBP363	0.86	1.43	-5.12E-01
NBP378	1.57	4.34	-1.02E+00
NBP392	4.09	4.08	3.31E-03
NBP406	1.61	3.76	-8.45E-01
NBP420	2.56	3.70	-3.68E-01
NBP441	9.19	7.27	2.35E-01
NBP468	18.44	15.45	1.77E-01
NBP495	631.60	640.94	-1.47E-02
NBP530	19.42	19.01	2.11E-02
NBP552	9.53	9.55	-1.84E-03

Tabla 13. Tabla comparativa de composiciones del RV de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.

Dado que todas las corrientes son correctas se procede a analizar las cargas térmicas para determinar si la torre simulada y la torre real son similares.

Ahora se analizan las cargas térmicas ver Tabla 14.

Servicios	kJ/h
condensador	6.47E+07
4 a 1	6.94E+07
4 a 5	2.50E+06
10 a 7	2.69E+07
10 a 11	2.05E+04
reboiler	6.28E+06

Tabla 14. Tabla de cargas térmicas de servicios de calentamiento y enfriamiento de la torre de destilación.

Dado que la torre real no opera con reboiler ni con condensador físico, lo ideal sería que la suma de estos fuera cero. Sin embargo es bueno que el servicio de enfriamiento tenga una carga mayor ya que la torre no está aislada térmicamente y el contacto con el ambiente ayuda a enfriarse. Por lo cual podemos decir que la torre simulada corresponde a la real, pues libera más energía térmica de la que consume.

En la parte superior de la torre no hay aislamiento térmico. Y según el operador se experimenta una mejor operación durante el invierno. Esto implica que la torre requiere de servicio de enfriamiento, así que la parte no aislada funciona como un condensador informal.

Después de revisar los flujos, cargas térmicas y las composiciones podemos decir que la simulación representa de una manera razonable a la torre real.

## Análisis de flexibilidad operativa

En el anexo 1 se pueden observar las series de datos que dieron origen a la siguiente serie de gráficos.

Se divide en cuatro series de gráficos, una para cada salida de la torre. Los componentes se agruparon por su orden de magnitud en cuanto al flujo molar.

### Análisis de flexibilidad operativa de la corriente del Domo

Es posible apreciar que para el domo, todos los componentes excepto el pseudocomponente NBP238 se mantienen claramente sin modificación alguna, esto se debe a que en ninguna otra corriente existen estos componentes en suficiente cantidad como para contribuir en el domo a su flujo de salida. Ver: Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18, Fig.19, Fig. 20, Fig. 21.

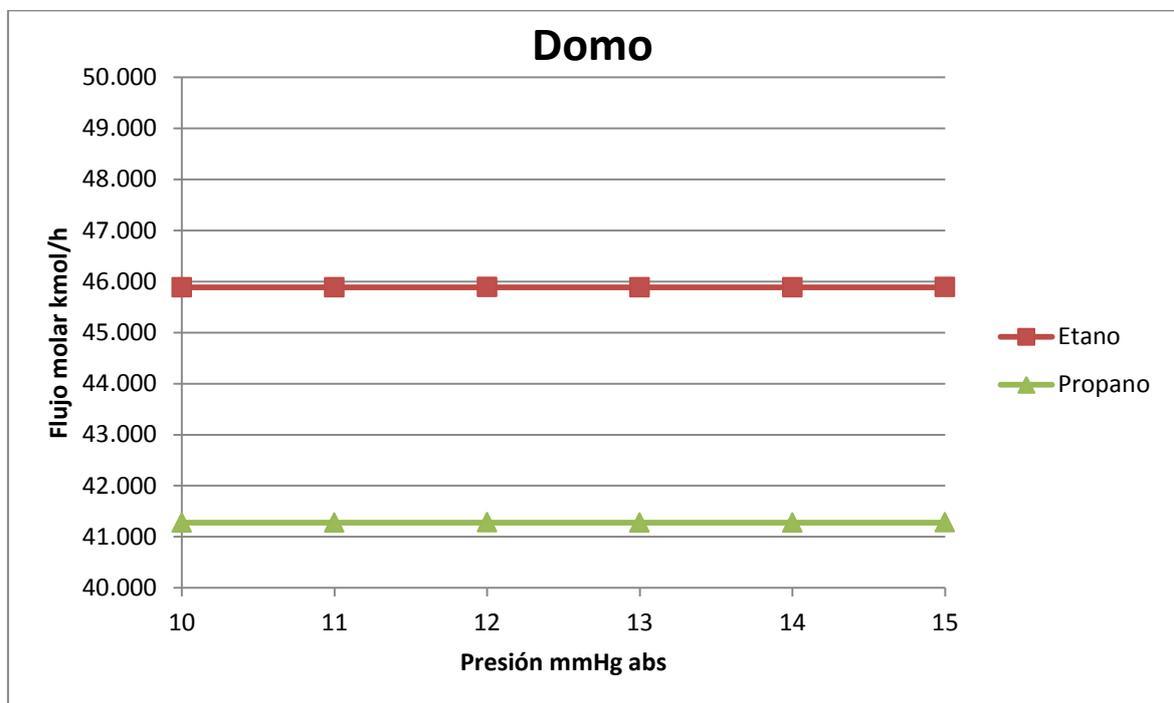


Fig. 16. Se observa comportamiento sin modificaciones para el etano y el propano al variar la presión del domo.

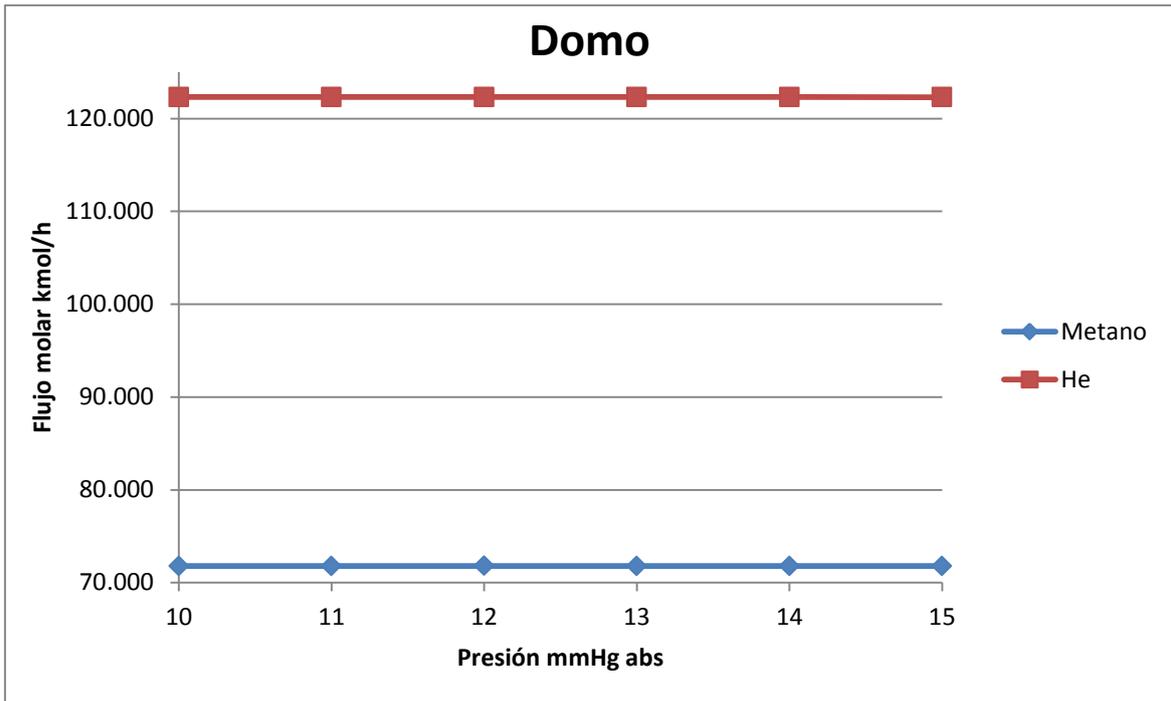


Fig. 17. Se observa comportamiento sin modificaciones para el metano y el helio al variar la presión del domo.

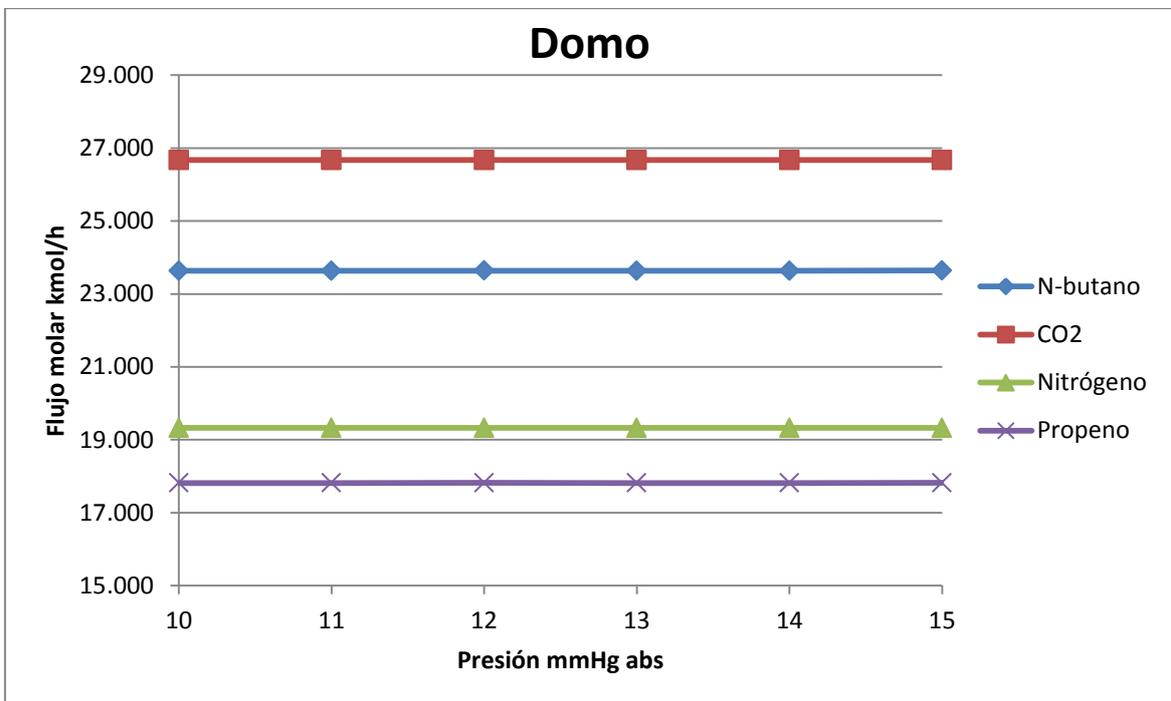


Fig. 18. Se observa comportamiento sin modificaciones para el n-butano, CO2, nitrógeno y propeno al variar la presión del domo.

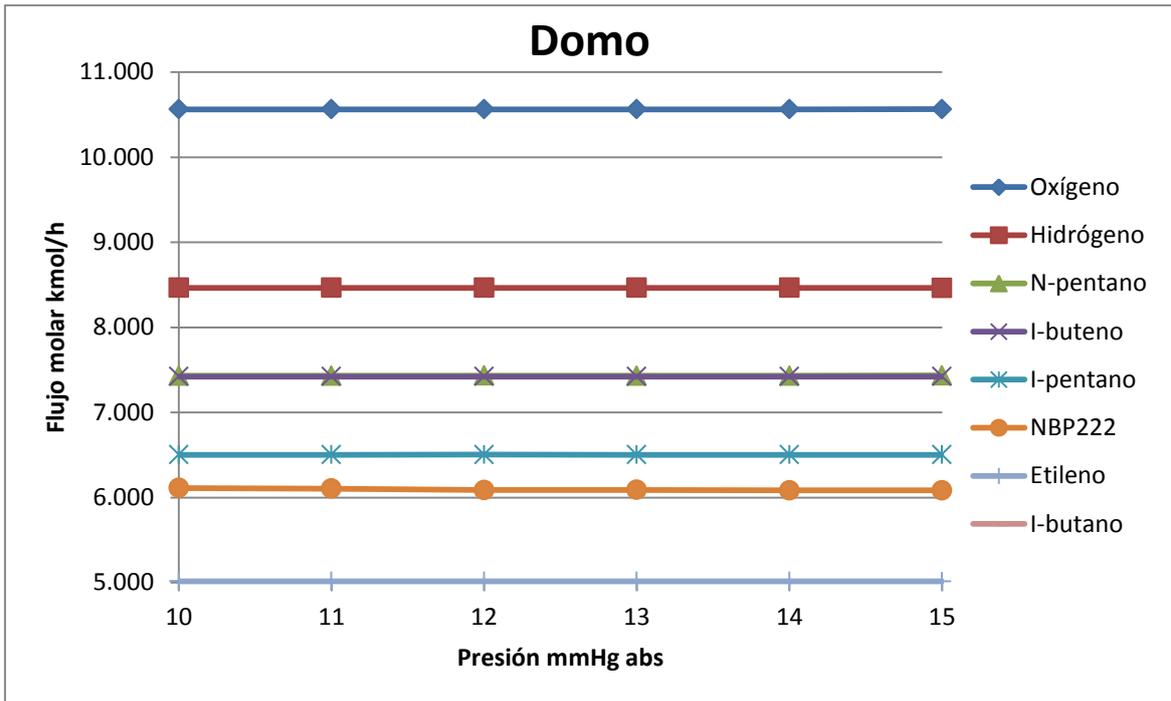


Fig. 19. Se observa comportamiento sin modificaciones para el oxígeno, hidrógeno, n-pentano, i-buteno, i-pentano, NBP222, etileno e i-butano al variar la presión del domo.

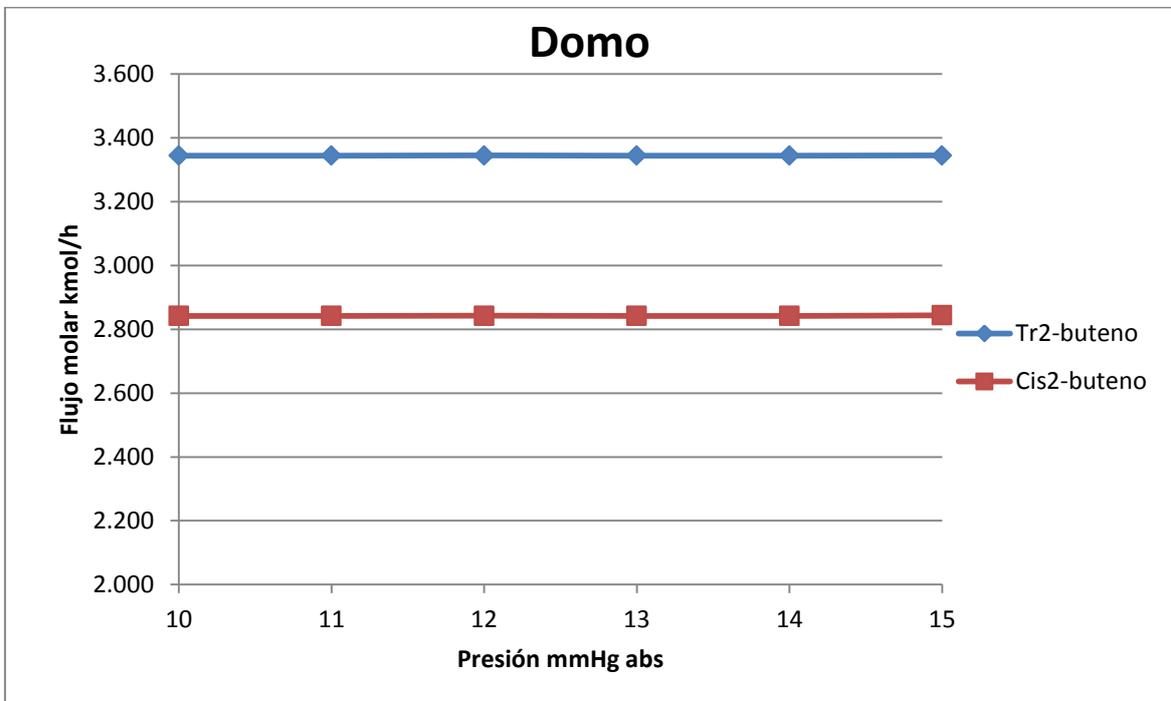


Fig. 20. Se observa comportamiento sin modificaciones para el tr2-buteno y cis2-buteno al variar la presión del domo.

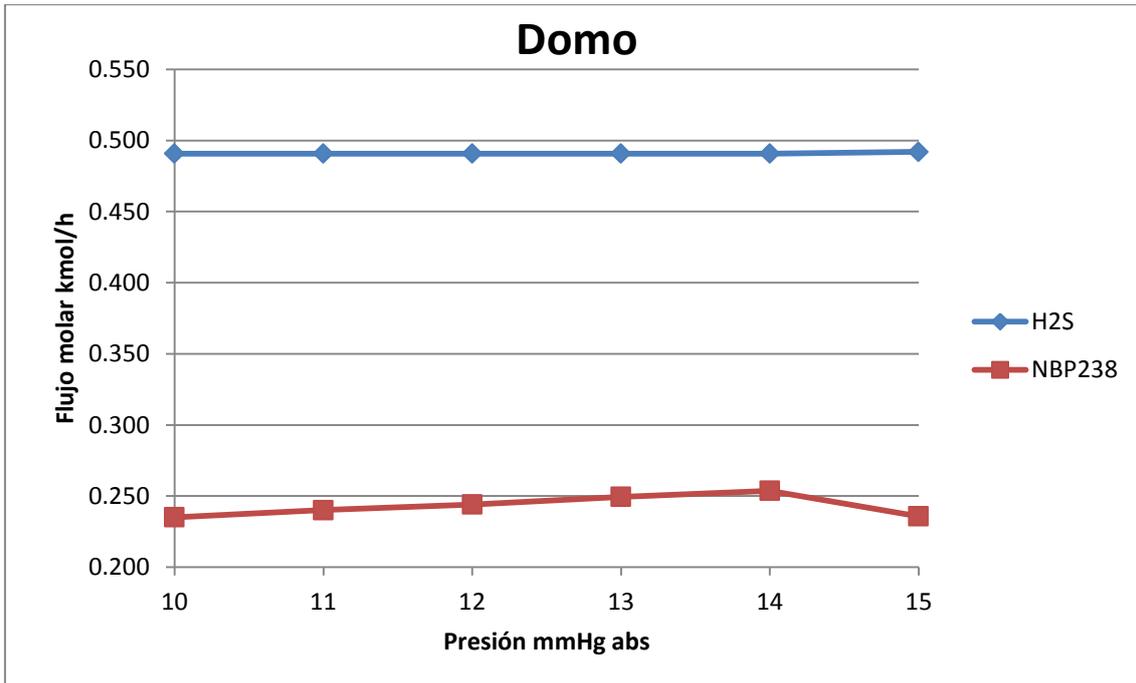


Fig. 21. Se observa comportamiento sin modificaciones para el H<sub>2</sub>S al variar la presión del domo. NBP238 es considerado una traza y no afecta el balance de la corriente pues las corrientes de componentes principales son del orden de centenas y medias centenas de kmol/h y el flujo de NBP238 es de 0.235 kmol/h por lo cual se considera invariable al variar la presión del domo.

## Análisis de flexibilidad operativa de la corriente de GOL

Es posible apreciar que para el GOL, todos los componentes se mantienen claramente sin modificación alguna excepto el pseudocomponente NBP441 que disminuye su presencia en la corriente de GOL de una manera tan insignificante como NBP238 en la corriente del domo.

En esta corriente de GOL los componentes más abundantes están en el orden de centenas y medias centenas de kmol/h y el flujo de NBP441 es de aproximadamente 3 kmol/h. Por lo cual es posible afirmar que no hay cambio en la composición de GOL. Ver: Fig. 22, Fig. 23, Fig. 24, Fig. 25.

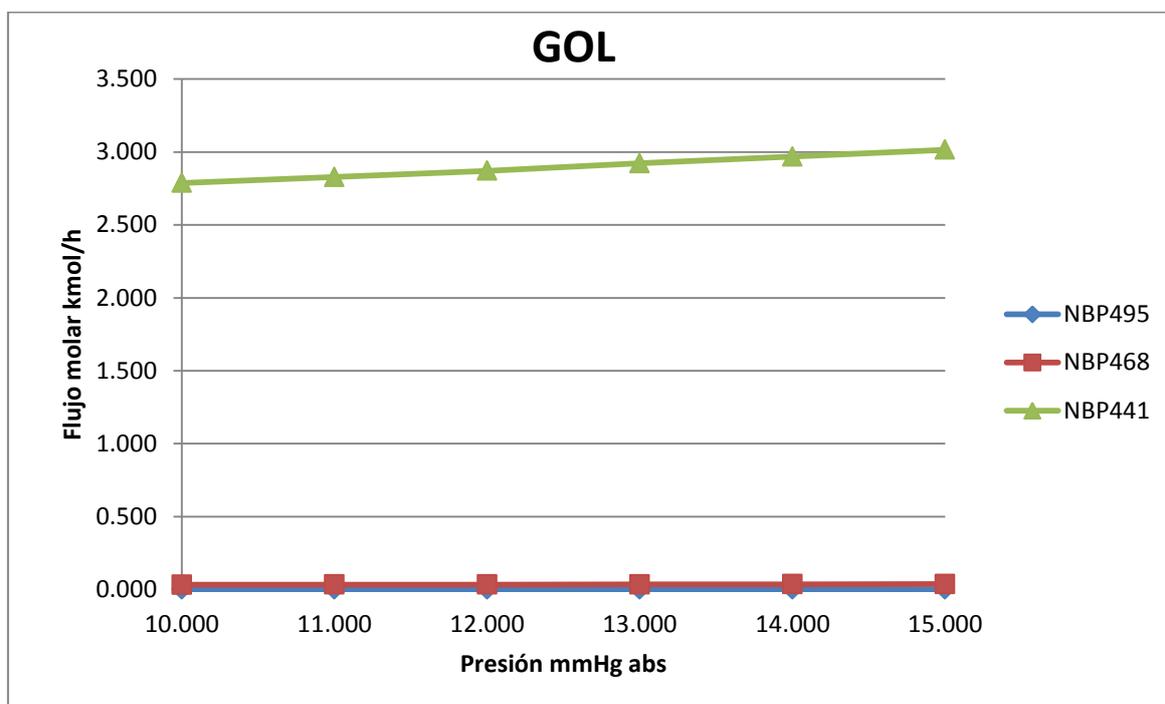


Fig. 22. Se observa comportamiento sin modificaciones para los componentes NBP495 y NBP468 al variar la presión del domo. NBP441 es considerado una traza y no afecta el balance de la corriente pues las corrientes de componentes principales son del orden de centenas y medias centenas de kmol/h y el flujo de NBP441 es de aproximadamente 3 kmol/h por lo cual se considera invariable al variar la presión del domo.

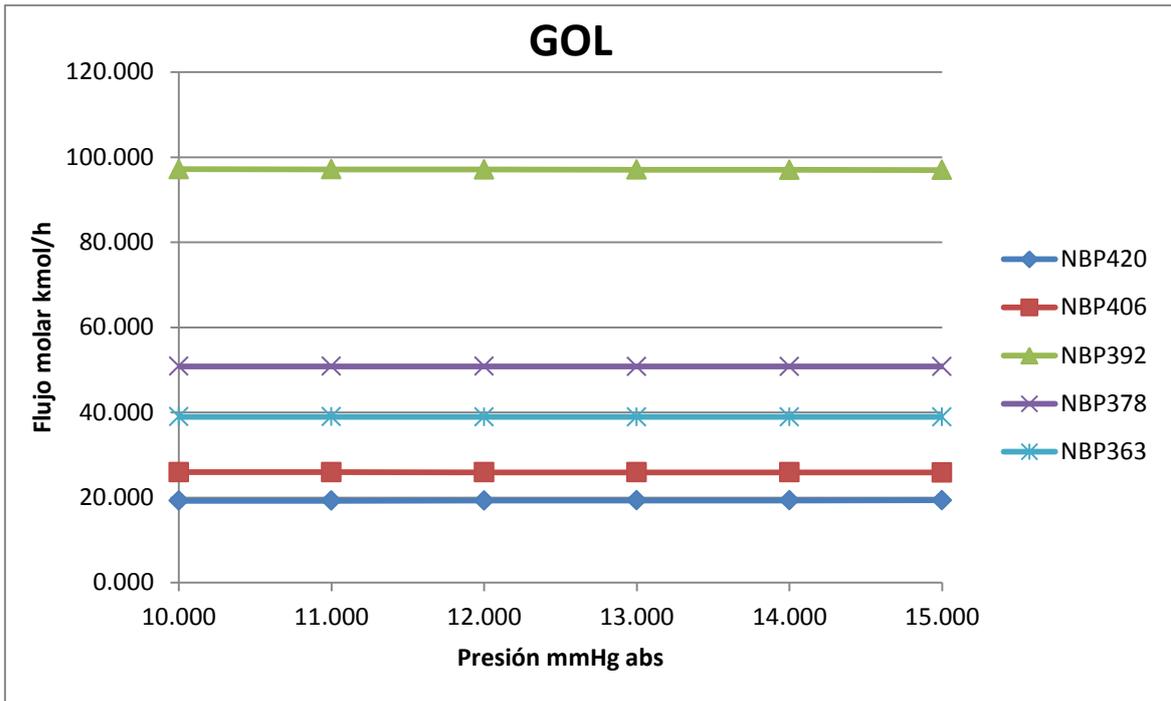


Fig. 23. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP420, NBP406, NBP392, NBP378 y NBP363 al variar la presión del domo.

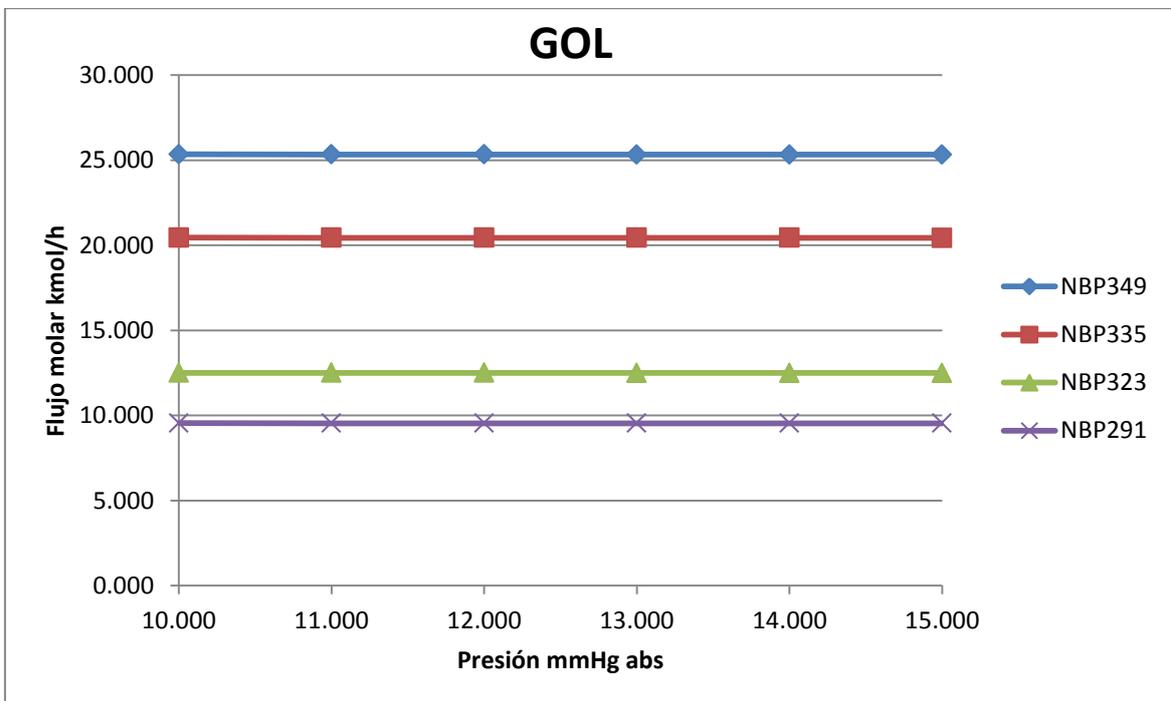


Fig. 24. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP349, NBP335, NBP323 y NBP291 al variar la presión del domo.

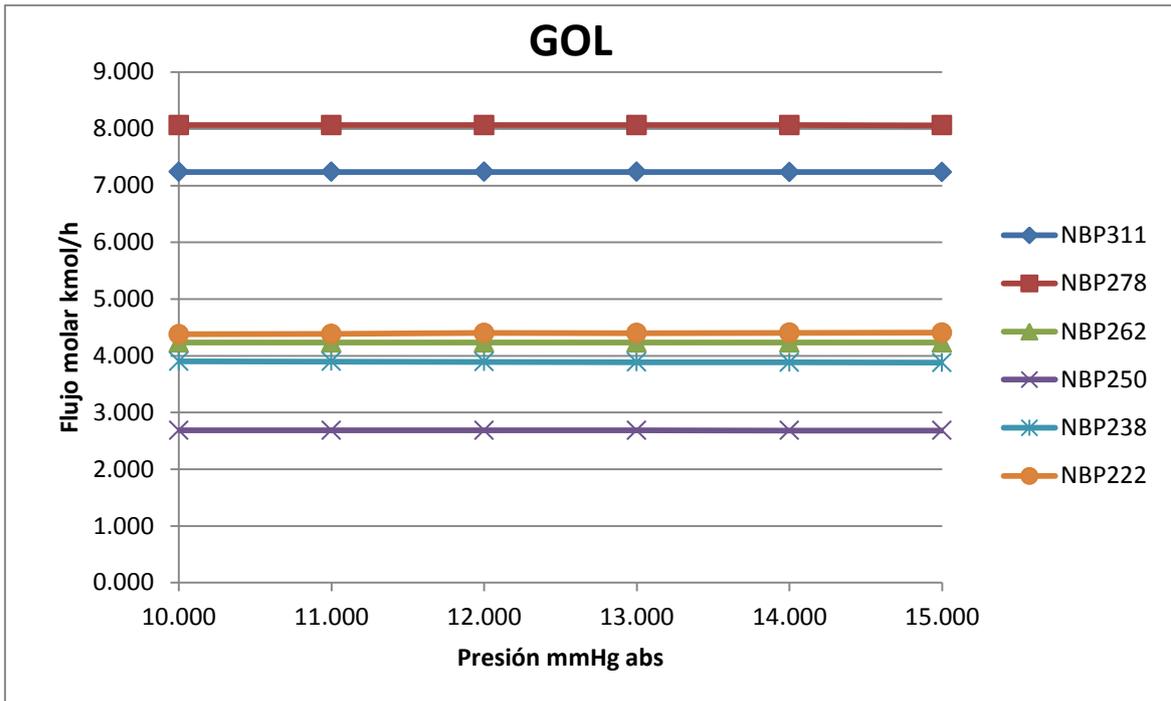


Fig. 25. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP311, NBP278, NBP262, NBP250, NBP238 y NBP222 al variar la presión del domo.

## Análisis de flexibilidad operativa de la corriente de GOP

Es posible apreciar que para el GOP, casi todos los componentes se mantienen claramente sin modificación alguna excepto los pseudocomponente NBP363, NBP311, NBP291, NBP278 y NBP552 que disminuye su presencia en la corriente de GOP de una manera tan insignificante como NBP238 en la corriente del domo.

En esta corriente de GOP los componentes más abundantes están en el orden de decenas de kmol/h y el flujo de NBP363 es de aproximadamente 0.5kmol/h. Por lo cual es posible afirmar que no hay cambio en la composición de GOP. Ver: Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28, Fig. 29, Fig. 30.

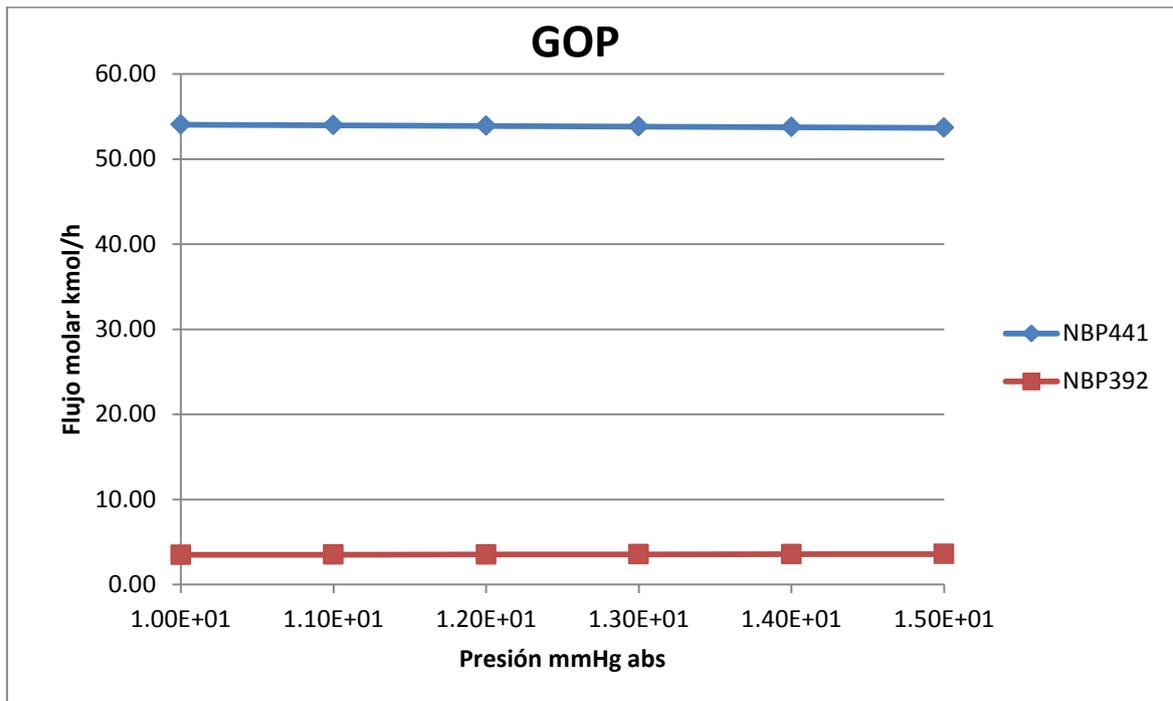


Fig. 26. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP441 y NBP392 al variar la presión del domo.

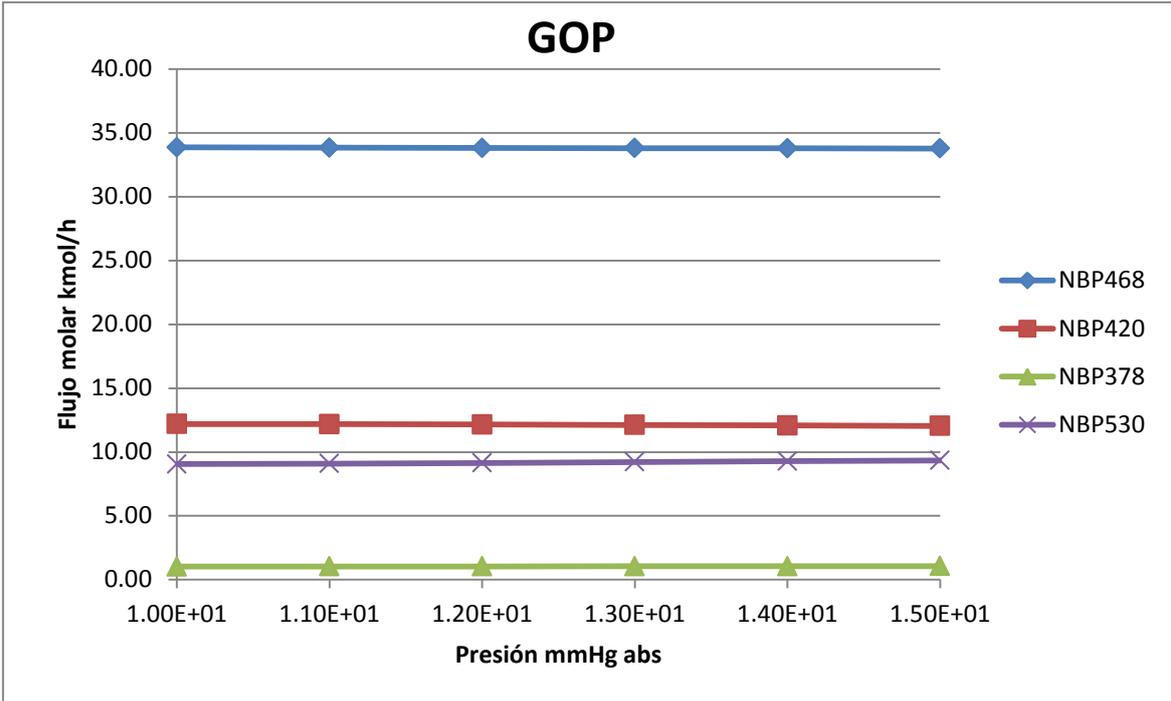


Fig. 27. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP468, NBP420, NBP378 y NBP530 al variar la presión del domo.

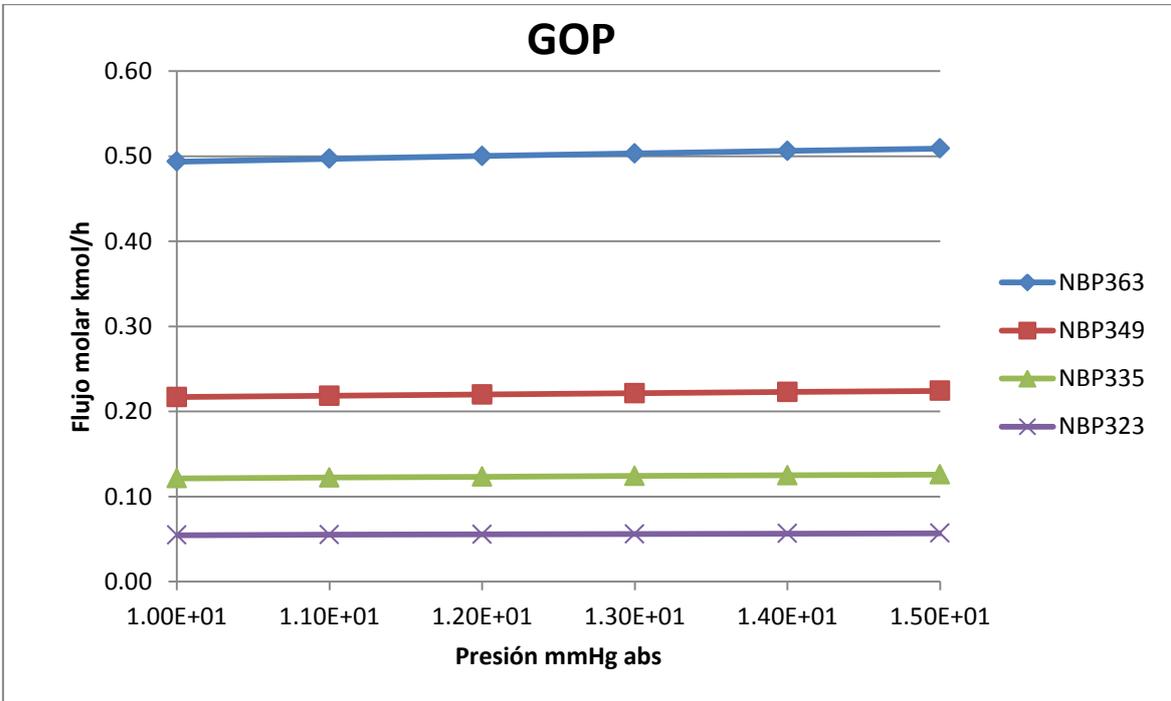


Fig. 28. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP363, NBP349, NBP335, y NBP323 al variar la presión del domo.

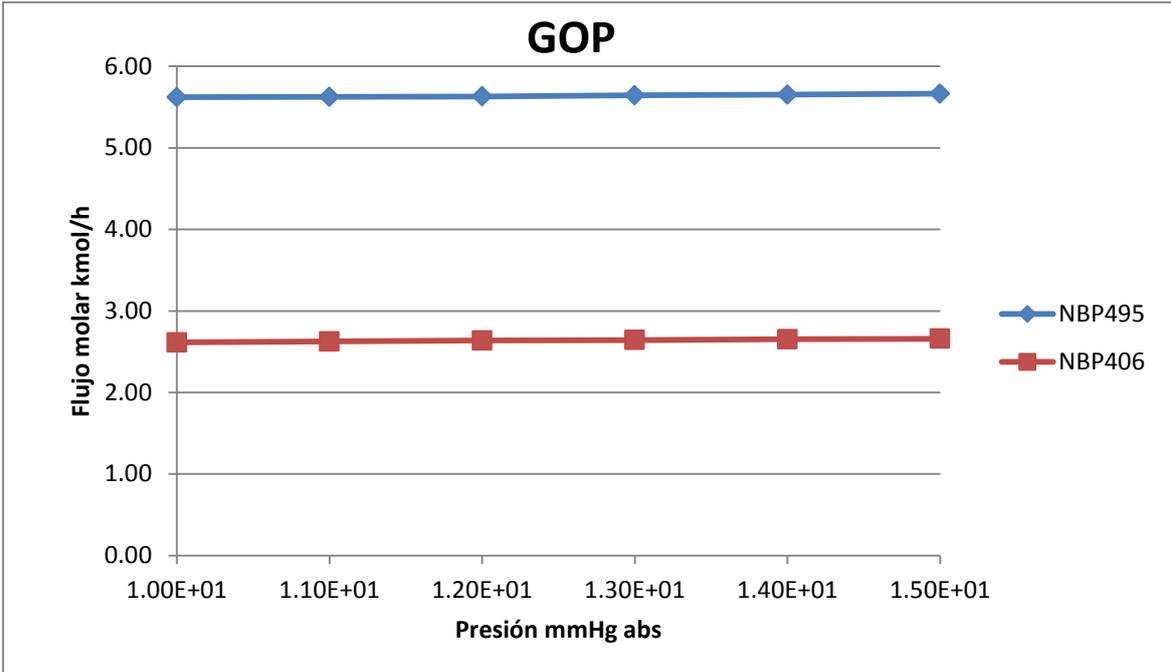


Fig. 29. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP495 y NBP406 al variar la presión del domo.

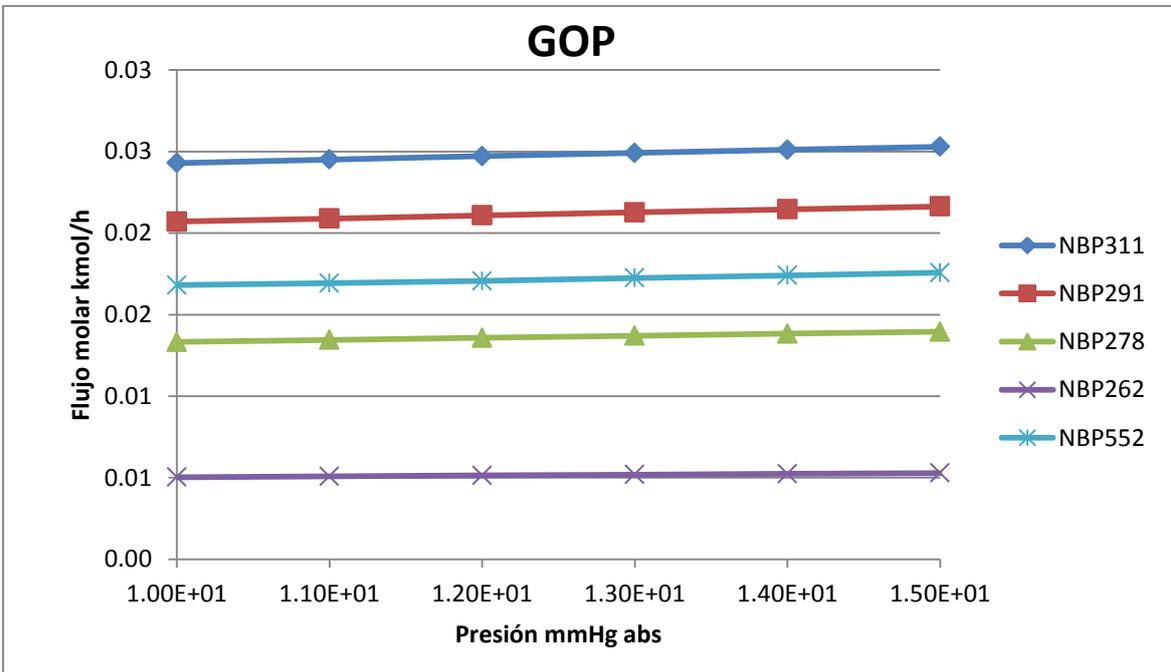


Fig. 30. Se observa que a mayor vacío los componentes NBP311, NBP291, NBP278, NBP262 y NBP552 disminuyen su presencia en la corriente al variar la presión del domo. Estos componentes son considerados trazas por su flujo molar tan pequeño. Por lo cual se considera que la corriente no cambia su composición.

## .Análisis de flexibilidad operativa de la corriente de RV

Es posible apreciar que para el RV, la gran mayoría de los componentes se disminuyen su presencia en la corriente. Sin embargo todos son muy pequeños con respecto al componente mayoritario NBP495 que es del orden de 631kmol/h y los siguientes más grandes son NBP530 con 19 kmol/h y NBP468 con 18 kmol/h y estos últimos no se modifican. Por lo cual esta corriente también se considera inmutante ante la variación de la presión. Ver: Fig. 31, Fig. 32, Fig. 33, Fig. 34, Fig. 35.

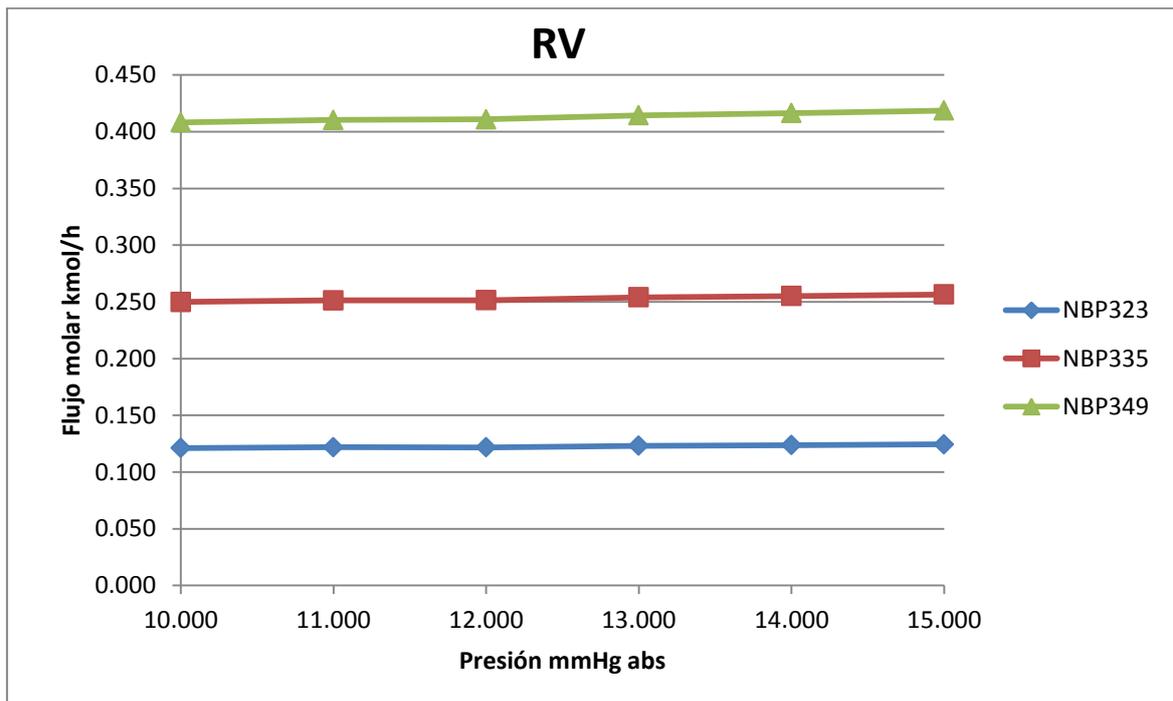


Fig. 31. Se observa una ligera disminución para NBP323, NBP335, y NBP349 al variar la presión del domo. Sin embargo por las razones antes explicadas se consideran constantes.

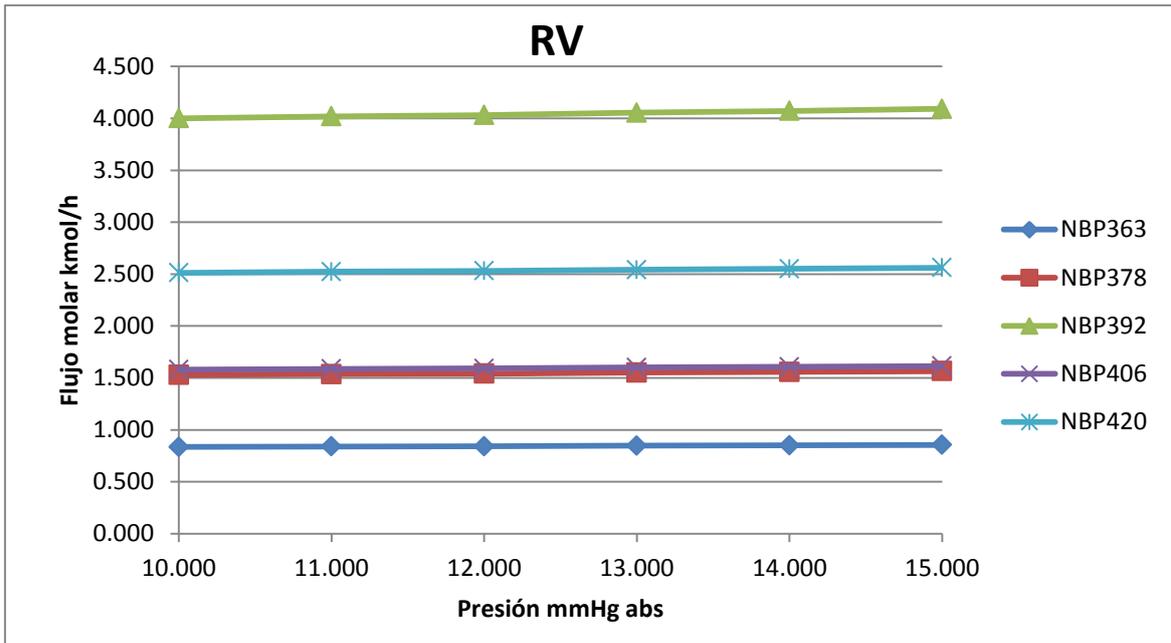


Fig. 32. Se observa una ligera disminución para NBP392 y NBP420 al variar la presión del domo. Sin embargo por las razones antes explicadas se consideran constantes. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP363, NBP378 y NBP406 al variar la presión del domo.

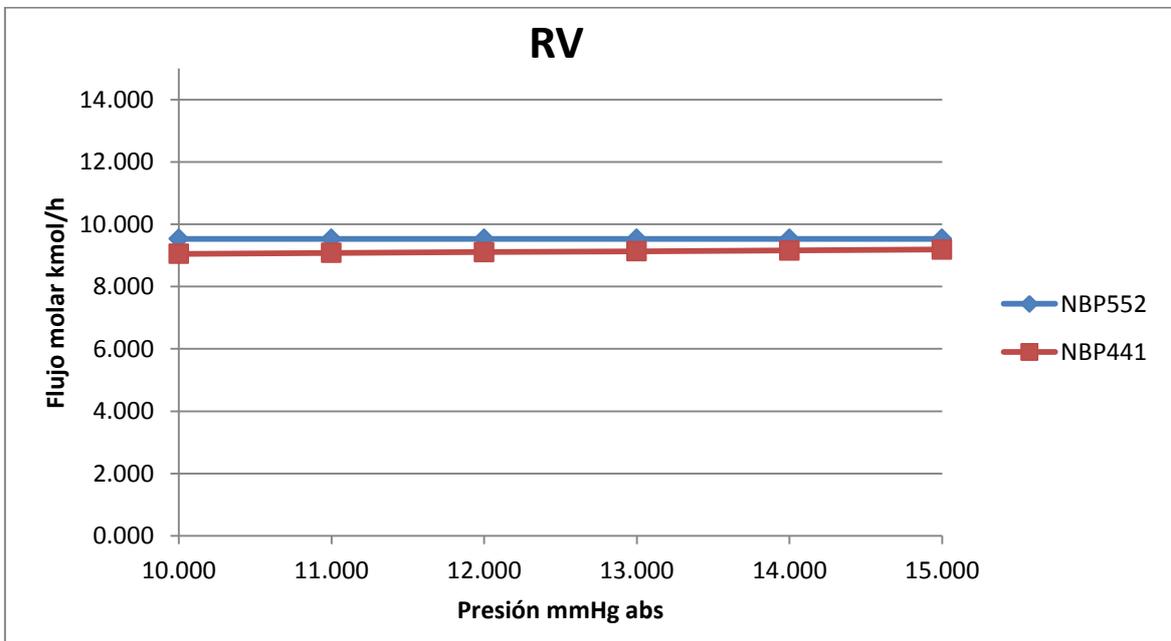


Fig. 33. Se observa una ligera disminución para NBP441 al variar la presión del domo. Sin embargo por las razones antes explicadas se considera constante. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP552 al variar la presión del domo.

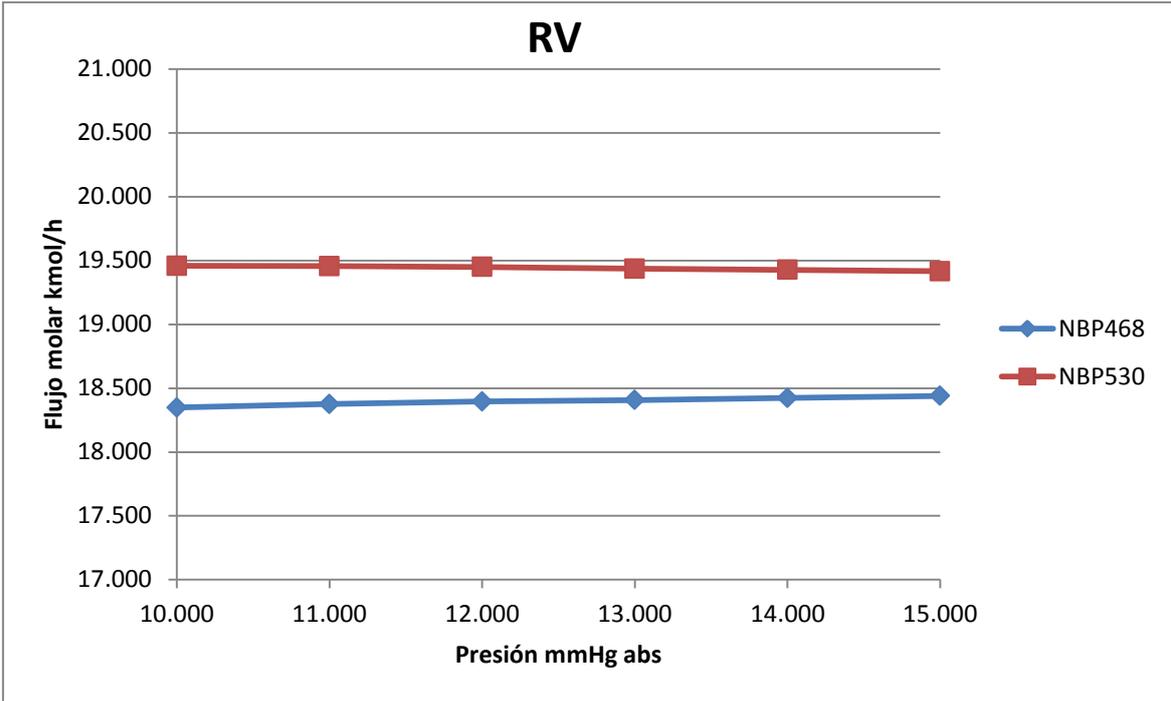


Fig. 34. Se observa un ligero aumento para NBP530 al variar la presión del domo. Sin embargo por las razones antes explicadas se considera constante. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP530 al variar la presión del domo.

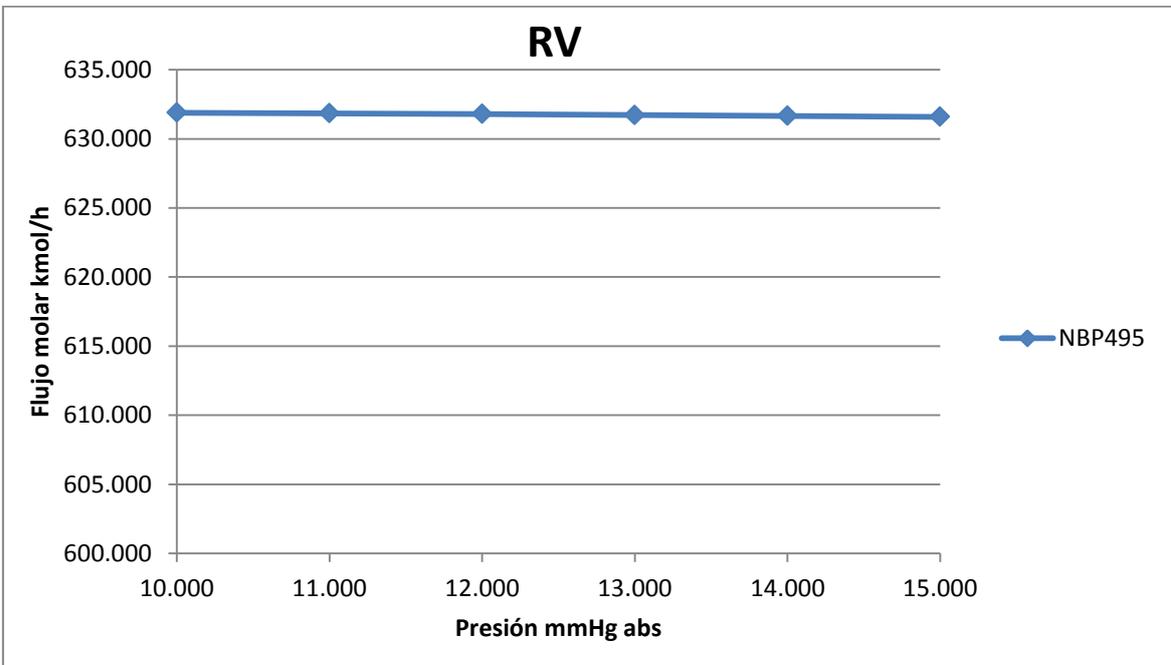


Fig. 35. Se observa comportamiento sin modificaciones para NBP495 al variar la presión del domo.

### Análisis de tanques VF2 y VFA3

Con el propósito de observar con mayor definición la variación de la composición en las corrientes de VFA2 y VFA3 se decidió expresar la composición en fracción molar. Pues esta manera de ver la composición permite comparar la abundancia de los componentes con respecto al total de moles existentes en la mezcla.

Vapor de VFA2.

Flujo BPD	5016.94	5266.97	5681.59	6289.73	7030.81	8278.22
	15mmHg	14mmHg	13mmHg	12mmHg	11mmHg	10mmHg
Metano	0.08796	0.07984	0.06923	0.05698	0.04687	0.03609
Etano	0.05621	0.05103	0.04424	0.03642	0.02995	0.02306
Etileno	0.00615	0.00558	0.00484	0.00398	0.00327	0.00252
Propano	0.05057	0.04591	0.03980	0.03276	0.02695	0.02075
Propeno	0.02183	0.01982	0.01718	0.01414	0.01163	0.00896
N-butano	0.02896	0.02629	0.02279	0.01876	0.01543	0.01188
I-butano	0.00539	0.00489	0.00424	0.00349	0.00287	0.00221
Cis2-buteno	0.00348	0.00316	0.00274	0.00226	0.00186	0.00143
Tr2-buteno	0.00410	0.00372	0.00323	0.00265	0.00218	0.00168
I-buteno	0.00909	0.00825	0.00716	0.00589	0.00485	0.00373
I-pentano	0.00797	0.00723	0.00627	0.00516	0.00425	0.00327
N-pentano	0.00910	0.00827	0.00717	0.00590	0.00485	0.00374
Oxígeno	0.01294	0.01175	0.01018	0.00838	0.00690	0.00531
Hidrógeno	0.01037	0.00941	0.00816	0.00672	0.00553	0.00425
Nitrógeno	0.02367	0.02149	0.01863	0.01534	0.01261	0.00971
CO2	0.03267	0.02966	0.02571	0.02117	0.01741	0.01340
H2S	0.00060	0.00055	0.00047	0.00039	0.00032	0.00025
He	0.14984	0.13602	0.11793	0.09707	0.07984	0.06147
<b>H2O</b>	<b>0.47408</b>	<b>0.52163</b>	<b>0.58393</b>	<b>0.65747</b>	<b>0.71828</b>	<b>0.78309</b>
NBP222	0.00489	0.00534	0.00586	0.00486	0.00400	0.00308
NBP238	0.00013	0.00016	0.00022	0.00018	0.00014	0.00011
NBP250	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001

Tabla 15. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA2.

Debido a que el agua es el componente mayoritario, igual o superior al 50% mol, no permite apreciar con definición los cambios en los componentes que se encuentran en menor proporción. Por lo anterior se decidió remover de la composición al agua y mediante la normalización de la composición de la corriente poder analizar la variación de la abundancia del resto de los componentes de la destilación Ver Tabla 16.

Vapor de VFA2 normalizado sin agua.

	15mmHg	14mmHg	13mmHg	12mmHg	11mmHg	10mmHg
Metano	0.16724	0.16691	0.16638	0.16637	0.16637	0.16636
Etano	0.10689	0.10668	0.10634	0.10633	0.10633	0.10633
Etileno	0.01169	0.01166	0.01163	0.01162	0.01162	0.01162
Propano	0.09615	0.09596	0.09566	0.09565	0.09565	0.09565
Propeno	0.04150	0.04142	0.04129	0.04129	0.04129	0.04129
N-butano	0.05506	0.05495	0.05478	0.05478	0.05478	0.05478
I-butano	0.01024	0.01022	0.01019	0.01019	0.01019	0.01019
Cis2-buteno	0.00662	0.00661	0.00659	0.00659	0.00659	0.00659
Tr2-buteno	0.00779	0.00778	0.00775	0.00775	0.00775	0.00775
I-buteno	0.01729	0.01726	0.01720	0.01720	0.01720	0.01720
I-pentano	0.01515	0.01512	0.01508	0.01507	0.01507	0.01507
N-pentano	0.01731	0.01728	0.01723	0.01723	0.01723	0.01723
Oxígeno	0.02460	0.02456	0.02448	0.02448	0.02448	0.02448
Hidrógeno	0.01972	0.01968	0.01961	0.01961	0.01961	0.01961
Nitrógeno	0.04501	0.04492	0.04478	0.04478	0.04478	0.04478
CO2	0.06212	0.06200	0.06180	0.06180	0.06180	0.06180
H2S	0.00114	0.00114	0.00114	0.00114	0.00114	0.00114
He	0.28490	0.28434	0.28343	0.28341	0.28341	0.28340
H2O	0.00930	0.01116	0.01409	0.01418	0.01419	0.01420
NBP222	0.00025	0.00034	0.00053	0.00052	0.00051	0.00050
NBP238	0.00001	0.00002	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003

Tabla 16. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA2, base seca.

A simple vista es fácil notar que los componentes se mantienen prácticamente en la misma proporción, excepto los pseudocomponentes. Estos incrementan su cantidad en la mezcla mientras mayor es el vacío, ver Fig. 36.

Esto implica que el vacío mientras mayor es, ayuda a evaporar componentes más pesados, los componentes ligeros no pueden incrementar su composición de manera significativa en el domo puesto que en las corrientes líquidas no hay presencia de estos componentes para poder transferirse a la fase vapor.

Los pseudocomponentes afectados por el vacío en el domo son NBP250, NBP222 y NBP238; y dado que NBP222 es mucho más abundante por ser el componente clave pesado del domo, se puede observar más claramente el comportamiento de NBP250 y NBP238 en la Fig. 37.

Una conclusión a la que se llega es que un mayor vacío no produce una mayor recuperación de ligeros.

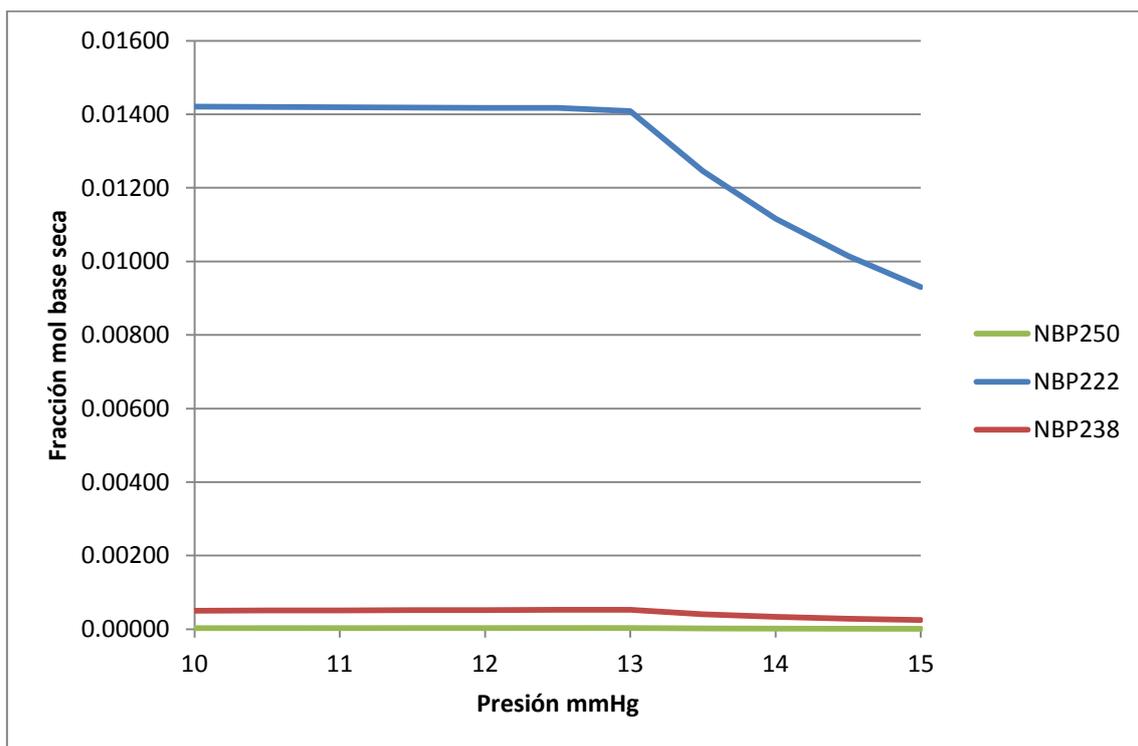


Fig. 36. Comportamiento de NBP250, NBP222 y NBP238 en el vapor de VFA2 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación. Al disminuir la presión más debajo de 13 mmHg abs ya no se obtienen efectos favorables en la recuperación de componentes ligeros.

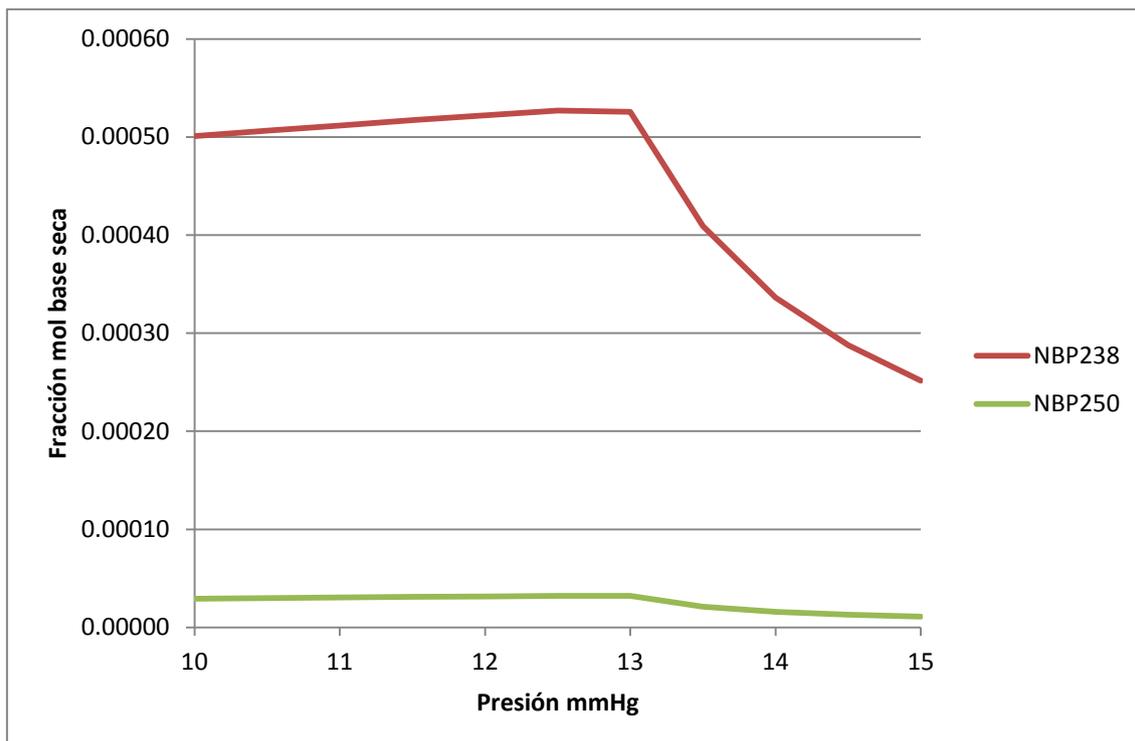


Fig. 37. Comportamiento de NBP250 y NBP238 en el vapor de VFA2 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación. Al disminuir la presión más debajo de 13 mmHg abs ya no se obtienen efectos favorables en la recuperación de componentes ligeros.

Es claramente notable que los pseudocomponentes a menos presión tienden a incrementar su composición en los vapores del domo de la torre de destilación, teniendo como valor límite 13 mmHg abs.

En el VFA3 tenemos una corriente de salida de aguas amargas. Se comparan sus componentes del mismo modo que con el VFA2, ver Tabla 17.

### Aguas amargas de VF3

Flujo BPD	4059.66	3810.01	3395.83	2787.58	2046.40	797.23
	15mmHg	14mmHg	13mmHg	12mmHg	11mmHg	10mmHg
H2O	0.99847	0.99899	0.99997	1.00000	1.00000	1.00000
NBP222	0.00143	0.00094	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000
NBP238	0.00009	0.00006	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
NBP250	0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Tabla 17. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA3.

Nuevamente, debido a que el agua es el componente mayoritario, igual o superior al 99% mol, no permite apreciar con definición los cambios en los componentes que se encuentran en menor proporción. Por lo anterior se decidió remover de la composición al agua y mediante la normalización de la composición de la corriente poder analizar la variación de la abundancia del resto de los componentes de la destilación Ver Tabla 18.

	15mmHg	14mmHg	13mmHg
NBP222	0.93809742	0.93111946	0.91422904
NBP238	0.05727764	0.06331189	0.07702938
NBP250	0.00462494	0.00556865	0.00874157

Tabla 18. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA3, base seca.

Es inútil analizar el resto de los casos ya que a menor presión estos componentes dejan de aparecer, dado que se encuentran en el vapor del VFA2.

Así pues únicamente se observa como el pseudocomponente NBP222 experimenta decremento en su presencia al incrementar el vacío, pues al ser el más ligero se evapora hacia la salida del VFA2. Ver Fig. 38

Por cuestiones de proporción los pseudocomponentes NBP238 y NBP250 se presentan en otra figura donde puede apreciarse que incrementan su presencia con el aumento de vacío, pues al ser más pesados después del domo tenderán

a regresar a su estado líquido, encontrándose así en la salida acuosa del VFA3, ver Fig. 39.

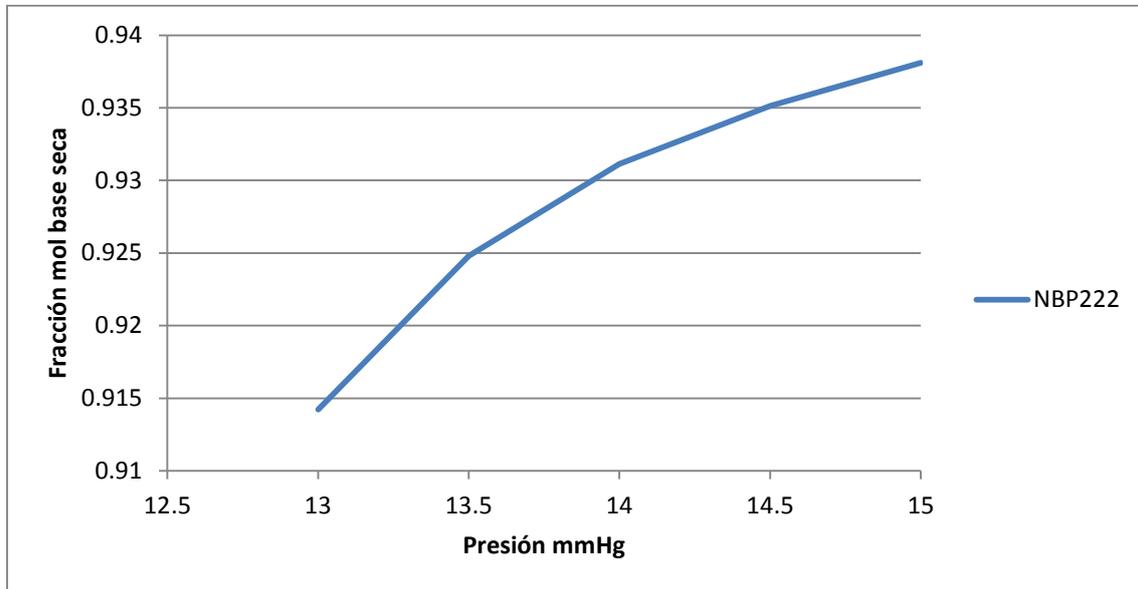


Fig. 38. Comportamiento de NBP222 en VFA3 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.

Este componente cada vez está menos presente porque se ha evaporado más y ahora se encuentra en el VFA2 en estado gaseoso.

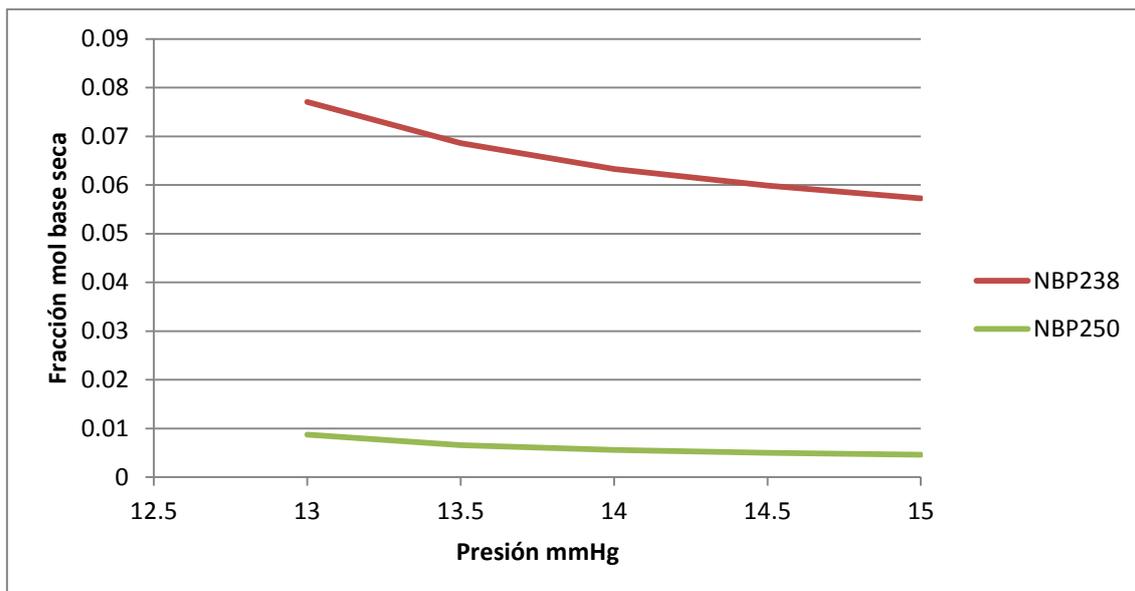


Fig. 39. Comportamiento de NBP250 y NBP238 en VFA3 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.

Estos componentes al ser más pesados incrementan su proporción ya que en el domo de la torre cada vez están más presentes debido al incremento del vacío.

Al analizar los flujos de salida del VFA2 y VFA3 se puede notar que a mayor vacío aumenta el flujo de vapor de VFA2 y disminuye el de líquido de VFA3, ver Fig. 40.

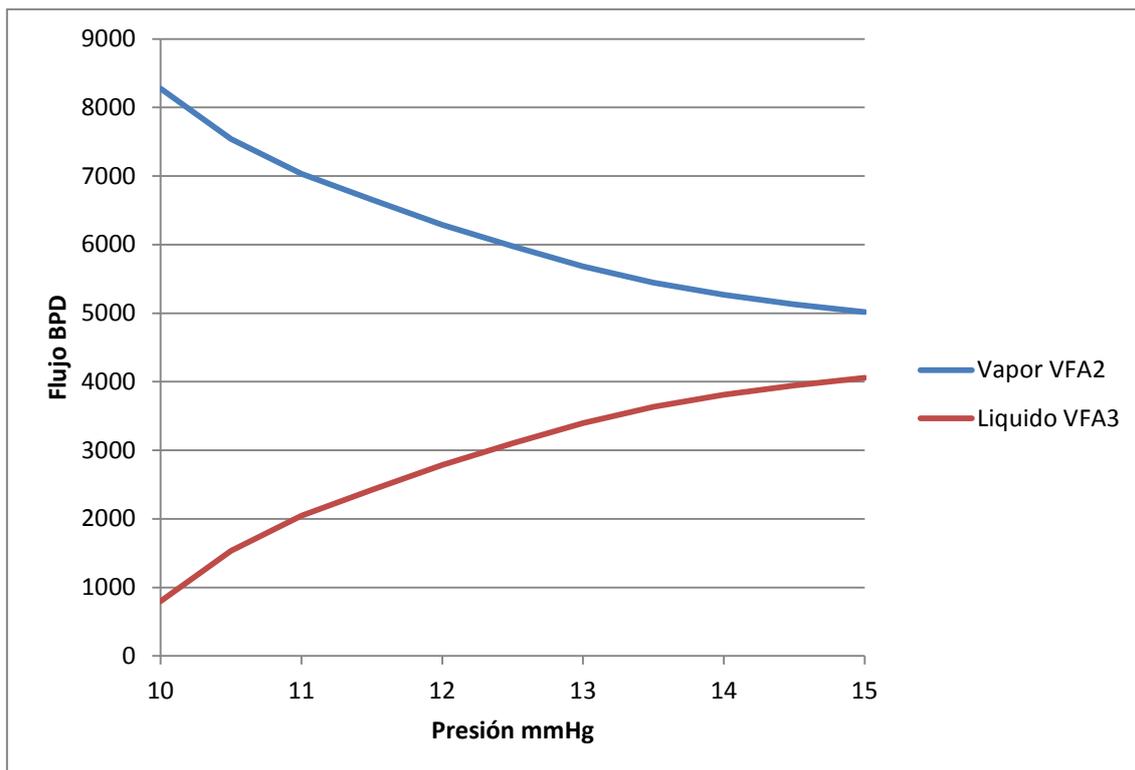


Fig. 40. Comportamiento de flujos de vapor de VFA2 y líquido de VFA3 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.

El flujo de vapor se incrementa al reducir la presión y el de líquido disminuye al aumentar el vacío. Esto es congruente y ciertamente tiene un efecto positivo en la operación de la torre de vacío.

## Conclusiones

La mezcla de corrientes de salida para simular la entrada a la torre fue aceptable pues todas las corrientes son representadas razonablemente.

La torre es capaz de operar en un rango de 10 a 15 mmHg abs sin problema alguno. La convergencia numérica es igualmente complicada en todos los casos debido a la alta sensibilidad del sistema a los estimados iniciales.

Como una estimación, la bomba de vacío de anillo líquido tiene el potencial suficiente para asegurar la operación de la torre así como el vacío requerido en ella sin embargo no tiene la capacidad para modificar en gran medida las composiciones.

La ausencia de aislamiento térmico en el presente trabajo se simuló por medio de un rehervidor y un condensador por lo cual en el análisis térmico se demuestra que la torre transfiere energía al ambiente, demostrando que la torre puede operar sin necesidad de energía adicional.

Los trabajos revisados previos disponibles en la literatura no toman en cuenta la corriente del domo de la torre de vacío, lo cual es un grave error pues esta corriente es altamente sensible al gradiente térmico entre la torre y el ambiente y la torre no está aislada térmicamente.

Al no considerar la corriente de salida del Domo ni la energía transferida al ambiente, se puede pensar que un análisis que no tome en cuenta esto es incorrecto, aunque no se determinó cuantitativamente el nivel de imprecisión.

Al incrementar el vacío en la torre de destilación se observa:

1. En el domo se puede observar que no hay cambio significativo, por debajo de 13 mmHg abs, en la composición conforme se aumenta el vacío.

2. En la salida de GOL y GOP se puede observar que no hay cambio significativo en la composición conforme se aumenta el vacío.
3. En el RV podemos notar que los componentes más pesados se concentran ligeramente mientras que todos los demás disminuyen su presencia ligeramente conforme se incrementa el vacío, sin embargo no se considera un cambio significativo. Se puede decir que no hubo cambio en cuanto a composición.

Contrario a lo esperado, al aumentar el vacío no se incrementa la cantidad de componentes en las diferentes corrientes, sin embargo es mínimo el cambio y dada la restricción de flujo de salida no hay una ganancia económica significativa.

La mezcla de corrientes de salida para simular la entrada a la torre fue aceptable pues todas las corrientes son representadas razonablemente.

Al modificar el sistema de vacío de la torre, se asegurará su funcionamiento dentro de los parámetros de diseño, lo cual resuelve el problema de operación. Sin embargo no hay mayor ganancia económica en los productos.

## Índice de tablas y figuras

- Fig. 1. Diagrama de una torre de destilación al vacío.
- Fig. 2. Funcionamiento de un eyector.
- Fig. 3. Secciones de un eyector.
- Fig.4. Clasificación técnica del vacío.
- Fig. 5. Bomba recíprocante.
- Fig. 6. Bomba centrífuga.
- Fig. 7. Bomba de vacío de anillo líquido.
- Fig. 8. Esquema del sistema de vacío.
- Fig. 9. Explicación de una etapa de destilación.
- Fig. 10. Representación del balance MESH de una torre de destilación.
- Fig. 11. Componentes de la simulación.
- Fig. 12. Corriente de alimentación resultante.
- Fig. 13. Alimentación resultante de alimentación a la torre.
- Fig. 14. Esquema de corrientes de la torre.
- Fig. 15. Especificaciones de los grados de libertad de la torre.
- Fig. 16. Comportamiento de etano y el propano al variar la presión del domo.
- Fig. 17. Comportamiento de metano y el helio en el domo al variar la presión del domo.
- Fig. 18. Comportamiento de n-butano, CO<sub>2</sub>, nitrógeno y propeno en el domo al variar la presión del domo.
- Fig. 19. Comportamiento de oxígeno, hidrógeno, n-pentano, i-buteno, i-pentano, NBP222, etileno e i-butano en el domo al variar la presión del domo.
- Fig. 20. Comportamiento de tr2-buteno y cis2-buteno en el domo al variar la presión del domo.
- Fig. 21. Comportamiento de H<sub>2</sub>S y NBP238 en el domo al variar la presión del domo.
- Fig. 22. Se observa comportamiento sin modificaciones para los componentes NBP495, NBP441 y NBP468 en GOL al variar la presión del domo.
- Fig. 23. Comportamiento de NBP420, NBP406, NBP392, NBP378 y NBP363 en GOL al variar la presión del domo.

- Fig. 24. Comportamiento de NBP349, NBP335, NBP323 y NBP291 en GOL al variar la presión del domo.
- Fig. 25. Comportamiento de NBP311, NBP278, NBP262, NBP250, NBP238 y NBP222 en GOL al variar la presión del domo.
- Fig. 26. Comportamiento de NBP441 y NBP392 en GOP al variar la presión del domo.
- Fig. 27. Comportamiento de NBP468, NBP420, NBP378 y NBP530 en GOP al variar la presión del domo.
- Fig. 28. Comportamiento de NBP363, NBP349, NBP335, y NBP323 en GOP al variar la presión del domo.
- Fig. 29. Comportamiento de NBP495 y NBP406 en GOP al variar la presión del domo.
- Fig. 30. Comportamiento de NBP311, NBP291, NBP278, NBP262 y NBP552 en GOP al variar la presión del domo
- Fig. 31. Comportamiento de NBP323, NBP335, y NBP349 en RV al variar la presión del domo.
- Fig. 32. Comportamiento de NBP392, NBP363, NBP378, NBP406 y NBP420 en RV al variar la presión del domo.
- Fig. 33. Comportamiento de NBP441 en RV al variar la presión del domo.
- Fig.34 Comportamiento de NBP530 en RV al variar la presión del domo.
- Fig. 35. Comportamiento de NBP495 en RV al variar la presión del domo.
- Fig. 36. Comportamiento de BP250, NBP222 y NBP238 en el vapor de VFA2 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.
- Fig. 37. Comportamiento de NBP250 y NBP238 en el vapor de VFA2 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.
- Fig. 38. Comportamiento de NBP222 en VFA3 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.
- Fig. 39. Comportamiento de NBP250 y NBP238 en VFA3 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.
- Fig. 40. Comportamiento de flujos de vapor de VF2 y líquido de VFA3 con respecto al vacío logrado en el domo de la torre de destilación.

- Tabla 1. Especificaciones originales del paquete de vacío.
- Tabla 2. Recomendaciones de selección de paquete termodinámico.
- Tabla 3. Condiciones de operación de las corrientes de salida laterales de la torre de destilación al vacío.
- Tabla 4. Condiciones de operación de la corrientes de salida del domo de la torre de destilación al vacío.
- Tabla 5. Temperaturas conocidas de la operación de la torre.
- Tabla 6. Presiones conocidas de la operación de la torre.
- Tabla 7. Flujos conocidos de la operación de la torre.
- Tabla 8. Condiciones de las recirculaciones de la torre.
- Tabla 9. Tabla comparativa de temperaturas y flujos de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.
- Tabla 10. Tabla comparativa de flujos molares del domo de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.
- Tabla 11. Tabla comparativa de flujos molares del GOL de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.
- Tabla 12. Tabla comparativa de composiciones del GOP de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.
- Tabla 13. Tabla comparativa de composiciones del RV de la simulación y de campo de la torre de destilación al vacío.
- Tabla 14. Tabla de cargas térmicas de servicios de calentamiento y enfriamiento de la torre de destilación.
- Tabla 15. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA2.
- Tabla 16. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA2, base seca.
- Tabla 17. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA3.
- Tabla 18. Análisis de la composición del vapor del tanque VFA3, base seca.

### Bibliografía:

1. PEMEX (Refinería Miguel Hidalgo Superintendencia General de Operación, sector No. 7, planta primaria No. 2) Manual de operación Planta de destilación al vacío de la Refinería Miguel Hidalgo, Tula Hidalgo.
2. CINDY ESMERALDA ALVARADO CHÍ, Aplicación de la integración de procesos para el mejoramiento de la unidad atmosférica y vacío # 2 de la refinería miguel hidalgo en lo referente a la reducción del consumo energético y el impacto ambiental, 2011, Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
3. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ingeniería. Curso, Operaciones unitarias de transferencia de materia. MARÍA CRISTINA LÓPINA. Profesor Titular, Universidad de Buenos Aires. PROCESOS DE DESTILACIÓN ATMOSFÉRICA DE CRUDOS Y AL VACÍO. Buenos Aires, Argentina. 2003.
4. P.C Carman. Molecular Distillation and Sublimation. RSC Publishing. 1948.
5. Universidad de los Andes. Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. RENNOLA ALARCON LEONARDO Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Química, ULA. Diseño de plantas 1. Eyectores. Revisado 09/2012.
6. J.M. PEDRONI Y ASOCIADOS S.A. Eyectores y sistemas de vacío. <http://www.jmpedroni.com/eyectores.htm> Revisado 09/2012.
7. MetAs, S.A. de C.V., GuiaMetAs, boletín periódico del laboratorio de metrología, Ing. Noel Gutiérrez, Tipos de presión y vacío. No. 3, pg. 3 2002.

8. Oswaldo Javier Valverde Jaramillo, Selección de Sistema de Vacío Utilizando Bombas Tipo Distribuidor Giratorio, 2009, Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador.
9. J.D. Seader – Henley, Separation Process Principles. Wiley. U.S.A., Ed. 2, 2006.
10. Castellan, G.W., Fisicoquímica, Ed. 2. U.S.A., Addison-Wesley Iberoamericana, 1987.
11. Aspen Tech, Aspen Hysys, Manuales del Simulador Aspen-HYSYS. 2011.
12. Peng, D. Y.; Robinson, D. B. A New Two-Constant Equation of State. Ind. Eng. Chem. Fundam. 1976, 15, 59.
13. Honeywell International, AspenTech Manual Hysys. 2004
14. Instituto Mexicano del Petróleo, PEMEX. Optimización de torres de destilación. Manual de Destilación. México DF. 2006.
15. Phillip C. Wankat , Separation Process Engineering. Prentice Hall. U.S.A., Ed. 3, 2013.
16. César Sánchez-Correa, Jaime Arturo-Calvache, Esteban Álvarez-Aguilar. Desarrollo de un algoritmo para la simulación de una columna de absorción para hidrocarburos de C3 a C6 procedentes del gas natural por el modelo de etapas de equilibrio. Facultad de Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia. 2011

## Anexo 1

Esta tabla da origen a los gráficos de componentes del domo. El flujo es en kmol/h.

Domo						
	15 mmHgabs	14 mmHgabs	13 mmHgabs	12 mmHgabs	11 mmHgabs	10 mmHgabs
Metano	71.795	71.797	71.796	71.799	71.797	71.797
Etano	45.888	45.885	45.884	45.887	45.885	45.885
Etileno	5.015	5.017	5.017	5.017	5.017	5.017
Propano	41.279	41.275	41.275	41.279	41.275	41.275
Propeno	17.819	17.817	17.816	17.818	17.817	17.817
N-butano	23.641	23.634	23.634	23.637	23.634	23.635
I-butano	4.398	4.396	4.396	4.397	4.396	4.396
Cis2-buteno	2.844	2.842	2.842	2.843	2.842	2.842
Tr2-buteno	3.345	3.344	3.344	3.345	3.344	3.344
I-buteno	7.423	7.422	7.422	7.423	7.422	7.422
I-pentano	6.504	6.503	6.503	6.505	6.504	6.504
N-pentano	7.436	7.431	7.431	7.433	7.431	7.431
Oxígeno	10.565	10.563	10.563	10.563	10.563	10.563
Hidrógeno	8.463	8.464	8.464	8.464	8.464	8.464
Nitrógeno	19.325	19.324	19.324	19.324	19.324	19.324
CO2	26.671	26.670	26.670	26.671	26.670	26.670
H2S	0.492	0.491	0.491	0.491	0.491	0.491
He	122.305	122.308	122.307	122.312	122.307	122.307
NBP222	6.084	6.085	6.091	6.089	6.104	6.112
NBP238	0.236	0.254	0.249	0.244	0.240	0.235

Esta tabla da origen a los gráficos de componentes del GOL. El flujo es en kmol/h.

GOL	15 mmHgabs	14 mmHgabs	13 mmHgabs	12 mmHgabs	11 mmHgabs	10 mmHgabs
NBP222	4.408	4.404	4.399	4.401	4.385	4.378
NBP238	3.878	3.882	3.887	3.892	3.896	3.901
NBP250	2.683	2.683	2.684	2.685	2.685	2.686
NBP262	4.232	4.232	4.232	4.233	4.233	4.233
NBP278	8.064	8.064	8.064	8.065	8.065	8.065
NBP291	9.543	9.543	9.544	9.545	9.545	9.545
NBP311	7.239	7.239	7.240	7.241	7.241	7.241
NBP323	12.497	12.498	12.499	12.501	12.501	12.502
NBP335	20.435	20.437	20.439	20.443	20.444	20.446
NBP349	25.325	25.328	25.332	25.337	25.339	25.343
NBP363	38.943	38.950	38.957	38.966	38.972	38.979
NBP378	50.795	50.809	50.822	50.837	50.848	50.862
NBP392	96.980	97.017	97.054	97.095	97.129	97.169
NBP406	25.897	25.911	25.926	25.941	25.957	25.977
NBP420	19.354	19.328	19.307	19.274	19.262	19.257
NBP441	3.015	2.968	2.922	2.871	2.828	2.788
NBP468	0.038	0.037	0.036	0.035	0.034	0.033
NBP495	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Esta tabla da origen a los gráficos de componentes del GOP. El flujo es en kmol/h.

GOP	15 mmHgabs	14 mmHgabs	13 mmHgabs	12 mmHgabs	11 mmHgabs	10 mmHgabs
NBP262	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
NBP278	0.01	0.014	0.014	0.014	0.013	0.013
NBP291	0.02	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
NBP311	0.03	0.025	0.025	0.025	0.025	0.024
NBP323	0.06	0.056	0.056	0.056	0.055	0.055
NBP335	0.13	0.125	0.124	0.123	0.122	0.121
NBP349	0.22	0.223	0.221	0.220	0.218	0.217
NBP363	0.51	0.506	0.503	0.500	0.497	0.494
NBP378	1.06	1.056	1.050	1.044	1.037	1.031
NBP392	3.58	3.565	3.545	3.527	3.506	3.483
NBP406	2.66	2.653	2.644	2.638	2.626	2.613
NBP420	12.05	12.087	12.117	12.161	12.181	12.196
NBP441	53.68	53.758	53.829	53.907	53.974	54.044
NBP468	33.78	33.797	33.814	33.826	33.847	33.875
NBP495	5.66	5.653	5.644	5.630	5.625	5.622
NBP530	9.34	9.278	9.219	9.147	9.098	9.056
NBP552	0.02	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017

Esta tabla da origen a los gráficos de componentes del RV. El flujo es en kmol/h.

RV						
	15 mmHgabs	14 mmHgabs	13 mmHgabs	12 mmHgabs	11 mmHgabs	10 mmHgabs
NBP323	0.124	0.124	0.123	0.122	0.122	0.121
NBP335	0.257	0.255	0.254	0.251	0.251	0.250
NBP349	0.419	0.416	0.414	0.411	0.410	0.408
NBP363	0.856	0.851	0.847	0.841	0.839	0.835
NBP378	1.566	1.558	1.551	1.541	1.537	1.529
NBP392	4.091	4.071	4.054	4.031	4.019	4.001
NBP406	1.614	1.606	1.600	1.592	1.587	1.580
NBP420	2.562	2.551	2.541	2.531	2.523	2.512
NBP441	9.189	9.160	9.134	9.107	9.083	9.054
NBP468	18.439	18.423	18.407	18.396	18.376	18.349
NBP495	631.596	631.663	631.722	631.794	631.843	631.886
NBP530	19.416	19.428	19.437	19.451	19.456	19.459
NBP552	9.531	9.531	9.531	9.531	9.531	9.531