

**Determinación de las mejores condiciones de operación para la producción de disolvente 4  
(Varsol) en la torre de destilación T-651 de la refinería de Barrancabermeja**

**Andrés Rueda Chaparro**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Procesos de Refinación y  
Petroquímica**

**Director**

**PhD. Hernando Guerrero Amaya**

**Doctor en Electroquímica, Ciencia y Tecnología**

**Codirector**

**Ing. Libardo Navas Quiroga**

**Ingeniero Químico**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería Química**

**Ingeniería de Procesos de Refinación y Petroquímica**

**Bucaramanga**

**2022**

### **Dedicatoria**

Este trabajo es dedicado a mi esposa Margarita y a mis hijos Camilo, Juliana y Thomas porque estuvieron conmigo en este viaje, tanto en los momentos buenos como en los no tan buenos, siempre sacrificaron su tiempo para que yo pudiera lograr este objetivo. A mis padres y hermanos por siempre creer en mí.

A mi director de proyecto el PhD. Hernando Guerrero por su paciencia y enseñanzas y a mi amigo y Codirector, el Ingeniero Libardo Navas por su apoyo y confianza en mí, y a todos mis compañeros de clase que estuvieron en este proyecto y me ayudaron a completarlo.

**Tabla de contenido**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Introducción .....  | 10          |
| 1. Objetivos .....  | 12          |
| 1.1 Objetivo General .....  | 12          |
| 1.2 Objetivos específicos .....                                       | 12          |
| 2. Estado del arte .....  | 13          |
| 3. Metodología .....  | 15          |
| 3.1 Análisis estadístico del proceso .....                            | 16          |
| 3.1.1 <i>Recolección de datos históricos operacionales.</i> .....     | 16          |
| 3.1.2 <i>Análisis estadístico multivariable.</i> .....                | 18          |
| 3.2 Simulación y validación del proceso .....                         | 28          |
| 3.2.1 <i>Simulación en estado estacionario EE.</i> .....              | 28          |
| 3.2.2 <i>Validación de la simulación en EE.</i> .....                 | 31          |
| 3.3 Estudio de sensibilidad .....                                     | 34          |
| 3.3.1 <i>Comportamiento del proceso en rangos de operación.</i> ..... | 34          |
| 3.3.2 <i>Optimización del proceso.</i> .....                          | 40          |
| 4. Conclusiones .....   | 47          |
| 5. Recomendaciones .....  | 49          |
| Referencias Bibliográficas .....                                      | 50          |
| Apéndices .....   | 52          |

**Lista de figuras**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Diagrama de la metodología utilizada.....  | 15 |
| Figura 2. Comportamiento de las variables del proceso obtenidas para el año 2020. ....   | 18 |
| Figura 3. Comparativo del comportamiento de los modelos de regresión con los datos obtenidos de proceso. ....                          | 23 |
| Figura 4. Curvas de destilación de los Assays de carga año 2020.....   | 29 |
| Figura 5. Flowsheet, especificaciones y perfiles de la torre T-651. ....   | 30 |
| Figura 6. Curva de destilación del assay junio 2022. ....  | 35 |
| Figura 7. Configuración Case Study de Aspen HYSYS para plato de alimentación 35. ....  | 37 |
| Figura 8. Gráficos de contorno del estudio de sensibilidad para 1500 bpd de carga de alimento a diferentes platos de alimentación..... | 38 |
| Figura 9. Resultados de la optimización en función del plato de alimentación y flujo de carga.   | 45 |

**Lista de tablas**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Variables de proceso de la torre T-651.....   | 16 |
| Tabla 2. Coeficientes de correlación $R^2$ para los distintos órdenes de regresión. ....   | 19 |
| Tabla 3. Modelos de regresión para los parámetros de calidad y flujo de producción de<br>Disolvente 4 a partir de los datos de proceso obtenidos. .... | 20 |
| Tabla 4. Selección de variables de mayor influencia según el modelo de tercer orden. ....  | 25 |
| Tabla 5. Selección de variables manipulables y rango de manipulación.....  | 27 |
| Tabla 6. Criterios de validación de la simulación.....   | 32 |
| Tabla 7. Validación mensual de la simulación en EE.....  | 33 |
| Tabla 8. Validación promedio consolidada de la simulación en EE.....   | 34 |
| Tabla 9. Valores permisibles de calidad del DisolventeD4 según ECOPETROL S.A.....  | 35 |
| Tabla 10. Rangos para el análisis de sensibilidad.....   | 36 |
| Tabla 11. Tarifas industriales de la planta ECOPETROL S.A. ....  | 41 |
| Tabla 12. Resultados de la optimización. ....  | 42 |

**Lista de ecuaciones**

|                 |    |
|-----------------|----|
| Ecuación 1..... | 24 |
| Ecuación 2..... | 31 |

**Lista de apéndices**

|   |    |
|---|----|
| Apéndice A. Datasheet de la torre T-651.....  | 53 |
| Apéndice B. Curvas de destilación de la carga y datos de operación de las variables de entrada para las fechas seleccionadas del año 2020. ....   | 54 |
| Apéndice C. Gráficas de contorno del análisis de sensibilidad para 1000 y 2000 bpd de carga de alimento a diferentes platos de alimentación. .... | 56 |

## Resumen

**Título:** Determinación de las mejores condiciones de operación para la producción de Disolvente 4 (Varsol) en la torre de destilación T-651 de la Refinería de Barrancabermeja\*

**Autor:** Andres Rueda Chaparro\*\*

**Palabras claves:** Disolvente, Optimización, Modelamiento, Análisis de Sensibilidad, Estado Estacionario

### Descripción

El Disolvente 4 (Varsol) es uno de los de mayor producción en la Refinería de Barrancabermeja, la cual ha disminuido debido al cambio de dietas en las unidades de destilación primaria a causa del déficit de crudos livianos, esto ha repercutido en cambios en la operación de la torre de producción de Varsol, T-651. En el presente trabajo se realiza un estudio de optimización mediante el software de simulación Aspen HYSYS para obtener la mayor producción manteniendo los controles de calidad del producto.

Para el proceso de optimización de la torre de destilación se realizó un análisis estadístico de las variables que intervienen en la operación, para así determinar cuál de estas tienen un mayor impacto en la producción y en la calidad del Varsol mediante un análisis de regresión por método de mínimos cuadrados, donde se evidenció que las variables de operación más influyentes en la producción son el reflujo de cima y la temperatura de salida del rehervidor de calentamiento.

Después se realizó el modelamiento de la torre de destilación en estado estacionario y se validaron los datos de la simulación con los datos históricos de la unidad dando como resultado una desviación no mayor a un 10% de los datos simulados con respecto a los datos de operación. Con el modelo validado se procedió con la optimización realizando un análisis de sensibilidad donde se tomaron tres diferentes valores de carga, se modificaron los platos de entrada a la torre y las variables obtenidas en el análisis estadístico, se logró determinar que las mejores condiciones de operación para aumentar la producción de Varsol en la T-651 son: el plato de carga a la T-651 es el plato 25, el valor de reflujo de cima entre 680 a 1200 bpd y la temperatura de salida del rehervidor entre 376 a 380 °F.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Hernando Guerrero Amaya. Doctor en Electroquímica, Ciencia y Tecnología. Codirector Ing. Libardo Navas Quiroga Ingeniero Químico

### Abstract

**Title:** Determination of the best operating conditions for the production of Solvent 4 (Varsol) in the distillation tower T-651 of the Barrancabermeja Refinery \*

**Autor:** Andres Rueda Chaparro \*\*

**Keywords:** Solvent, Optimization, Modeling, Sensitivity Analysis, Stationary State

### Description

Solvent 4 (Varsol) is one of the solvents with the highest production at the Barrancabermeja Refinery, which has decreased due to the change of diets in the primary distillation units due to the deficit of light crude, this has had a negative impact in the production of the Varsol tower T-651. In the present paper, an optimization study is carried out using the Aspen HYSYS simulation software to obtain the highest production while maintaining product quality controls.

For the distillation tower optimization process, a statistical analysis of the variables involved in the operation was carried out, in order to determine which of these have a greater impact on the production and quality of Varsol through a regression analysis using the least squares method., where it was shown that the most influential operating variables in production are the top reflux and the outlet temperature of the reboiler.

Then, the modeling of the distillation tower in steady state was performed and the simulation data was validated with the historical data of the unit, resulting in a deviation of no more than 10% of the simulated data with respect to the operation data. With the validated model, the optimization was implemented by performing a sensitivity analysis where three different load values were taken, the input trays to the tower and the variables obtained in the statistical analysis were modified, it was possible to determine that the best operating conditions to increase the production of Varsol in the T-651 are: the input stage to the T-651 is stage 25, the reflux ratio value between 680 to 1200 bpd and the reboiler outlet temperature between 376 to 380 °F.

---

\* Graduate work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: PhD. Hernando Guerrero Amaya. Doctor in Electrochemistry, Science and Technology. Co-director Ing. Libardo Navas Quiroga Chemical Engineer

## Introducción

Los Disolventes son productos que se usan en la vida cotidiana y son claves en diferentes procesos de producción (Garbelotto, 2007; Morales, 2013). Uno de los productores en Colombia de Disolventes es la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL S.A, cuya producción promedio mensual de Disolventes Alifáticos en el año 2018 fue de 32.000 barriles. Estos Disolventes son derivados del petróleo y se producen en la planta de Especialidades mediante la destilación de naftas livianas. La unidad de Especialidades está comprendida por dos secciones, la sección Desisopentanizadora y la sección Estabilizadora; conformadas por las torres de fraccionamiento T-651 y T-681, respectivamente, cuyo uno de sus principales productos se obtiene por el fondo de la primera torre y es denominado Disolvente 4 (Varsol). Este, así como los demás Disolventes Alifáticos, son utilizados principalmente en la fabricación de resinas, ceras y betunes, para lavanderías y limpieza en general (ECOPETROL, 2020).

La torre T-651 está diseñada para una carga de 2.800 bpd de nafta liviana con una producción de Disolvente 4 de 980 bpd (ECOPETROL, 2009), no obstante, debido al cambio de las composiciones del crudo de carga en las unidades de destilación atmosférica a dietas de crudos más pesados (por la escasez de reservas de crudo liviano en el país (Puello Rugeles, 2021)), las características de la alimentación a la unidad de especialidades se vieron afectadas ocasionando cambios en la operación de esta torre. Estos cambios de operación afectaron los flujos de alimentación y de producción de Disolventes en un 50% aproximadamente, por lo que hoy en día, la carga de alimentación hacia la torre T-651 se encuentra entre los 1.400 a 1.500 bpd con una producción de Disolvente 4 de máximo 400 bpd en calidad.

Entre las estrategias utilizadas de análisis operacional, la industria de la refinación de petróleo utiliza herramientas de simulación de procesos mediante softwares especializados, ya que

ofrecen una gran versatilidad de los procesos simulados, permite gestionar el estudio de casos con diferentes condiciones operacionales e, incluso, realizar simulaciones en estado transitorio que permiten ver el comportamiento de las variables en el tiempo (Santafe Moros & Gozalvez Zafrilla, 2016; Vega et al., 2015). Asimismo, el uso de simuladores da una gran alternativa de estudio a las industrias ya que evita grandes inversiones en el sistema real, favorece su estudio sin comprometer la seguridad del personal humano, infraestructura o riesgo ambiental (Cari & Cayo, 2015; R. Torres & Castro, 2002).

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el presente trabajo pretende dar solución a la pregunta de investigación: ¿cuáles deben ser las mejores condiciones operacionales de la torre T-651, que proporcionen un mayor rendimiento del Disolvente 4 sin impactar su calidad? Para ello, el documento contará con un análisis estadístico de los datos históricos de operación de la torre T-651 con el fin de determinar las variables que más afectan el rendimiento en la producción de Disolvente 4, esto acompañado de la heurística y experticia en campo. Posteriormente, se realizará la simulación y validación de la torre T-651 en el simulador Aspen HYSYS con la datasheet de la torre y los datos históricos de las variables del proceso, donde se analizarán los casos de estudio pertinentes para examinar el comportamiento de la producción del Disolvente 4 a medida que se perturban las variables seleccionadas y, finalmente, se realizará la discusión de resultados donde se dará respuesta a la pregunta planteada.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Determinar las mejores condiciones de operación para la producción de Disolvente 4 (Varsol) en la torre de destilación T-651.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Identificar las variables de operación que afectan la calidad y el rendimiento del Disolvente 4
- Simular y validar en estado estacionario, mediante el software Aspen HYSYS, la torre desisopentanizadora T-651 de la Refinería de Barrancabermeja
- Evaluar y comparar mediante estudio de casos los diferentes esquemas de operación para optimizar el rendimiento de producción del Disolvente 4 en la torre T-651

## 2. Estado del arte

Durante varios años la industria del petróleo ha querido optimizar sus procesos mediante el estudio de los fenómenos fisicoquímicos que los rigen y mediante el uso de herramientas informáticas que puedan simular estos fenómenos. La producción de Disolventes no es la excepción y se han desarrollado algunos estudios que se describen a continuación:

En el año 2004 Torres, et al, desarrollaron una herramienta de simulación rigurosa de la unidad de producción de Disolventes alifáticos de la refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A mediante el software comercial AspenTech's HYSYS TM con el objetivo de garantizar las competencias necesarias que deben tener los operarios. Su principal enfoque es la capacitación del personal en tiempos más cortos y sin exponer la operación de la unidad de procesamiento por una mala operación al realizar corridas experimentales (E. Torres et al., 2004).

Avellán, et al, en 2007 realizaron una evaluación energética en la planta de producción de Disolventes FENIX de la ciudad de Managua (Nicaragua) de la refinería ESSO, esta valoración ayudó a estimar el consumo de energía y las eficiencias térmicas que tenían los diferentes procesos de producción de Disolventes. Las propiedades físicas y de transporte de los diferentes fluidos fueron caracterizados mediante el software PEGASYS de propiedad de ESSO. Se abordaron temas como el de integridad térmica, balance de masa, balance de energía y optimización energética (Avellán & Vega, 2007).

Un año después, en 2008, Jaimes Jaiver y Suárez Miguel, estudiaron la incidencia que tiene la curva de destilación de la nafta de alimento en la obtención del Disolvente 4 y las propiedades de este, usando modelos matemáticos y herramientas computacionales. Se logró determinar el intervalo óptimo de la curva de destilación de la nafta para la cual el Disolvente 4 se encontraba

dentro de los parámetros establecidos por los clientes de Ecopetrol S.A (Jaimes Figueroa & Suárez Jaimes, 2008).

Ferrada, P. Jose en el año 2009, desarrolló una nueva simulación del proceso de producción de Disolventes Alifáticos de la refinería de Barrancabermeja con fines educativos. Realizó una simulación del entorno de operación del proceso real para poder mostrar a los estudiantes de ingeniería química de la Universidad Industrial de Santander cómo los operadores realizan el control de la unidad (Ferrada, 2009).

Años después Cari, et al, en 2015 realizaron, mediante el software Aspen HYSYS versión 8.6, la simulación dinámica y estacionaria del proceso de producción de Disolvente 3 de una refinería y determinaron que para poder aumentar los rendimientos de este, la nafta de alimentación a la torre de producción debe cargarse con el mayor punto de inflamación posible y también dedujeron que las variables más influyentes en el proceso de producción de tal Disolvente son la presión de operación de la torre de fraccionamiento y la temperatura en el plato inferior a la línea de llegada del reflujo en la torre (Cari & Cayo, 2015).

Es así como, mediante la simulación del proceso de producción de Disolvente 4 en la torre T-651, se realizará un análisis sobre el impacto que tienen las variables de operación en la producción de éste manteniendo el producto en los parámetros de calidad establecidos por Ecopetrol S.A.

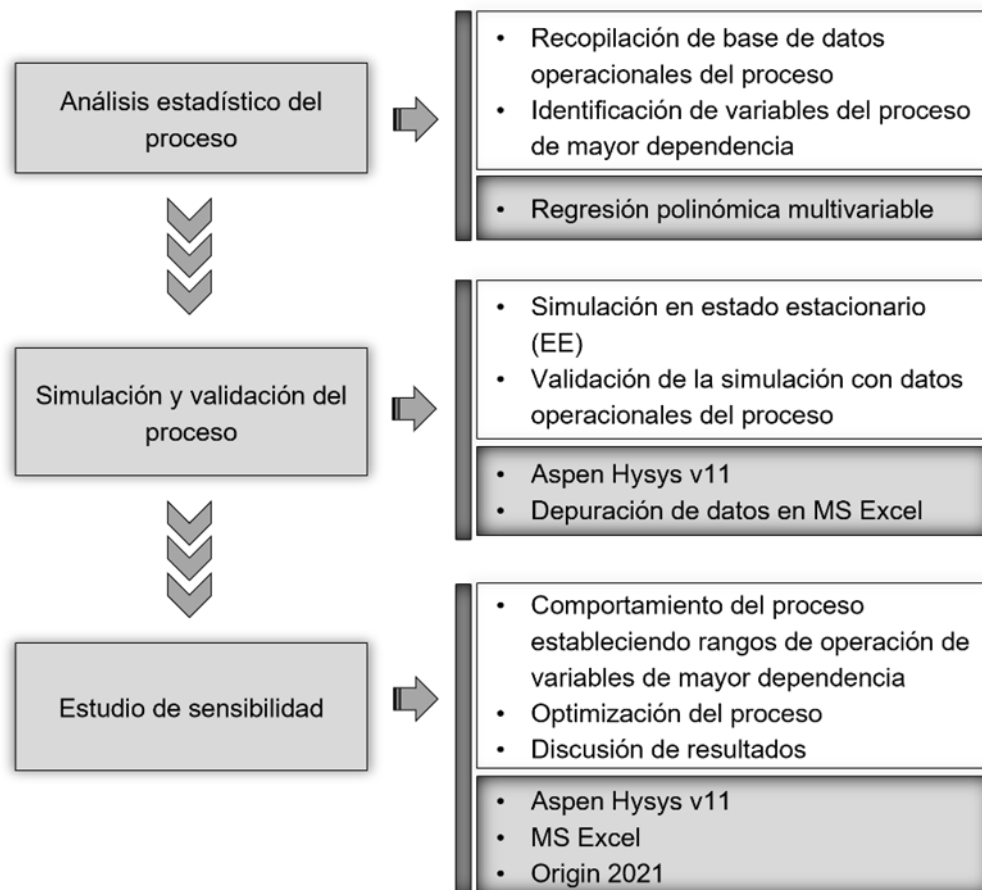
### 3. Metodología

Durante el desarrollo del presente trabajo se realizó una constante revisión bibliográfica para verificar, comparar y validar que toda la información obtenida en las diferentes etapas del proyecto esté acorde con las diversas teorías aplicadas al proceso analizado.

Para cumplir con los objetivos específicos planteados, a continuación, en la Figura 1 se presenta el diagrama de la metodología utilizada en el presente proyecto.

**Figura 1.**

*Diagrama de la metodología utilizada*



### 3.1 Análisis estadístico del proceso

#### 3.1.1 Recolección de datos históricos operacionales.

La recolección de los históricos operacionales de la torre de producción de Disolvente 4 se realizó mediante el uso del aplicativo PI DATALINK de la GRB. Dichos datos fueron capturados en el periodo comprendido entre enero y diciembre del año 2020, donde las variables tomadas se relacionan en la Tabla 1 y su comportamiento se muestra en la Figura 2.

**Tabla 1.**

*Variables de proceso de la torre T-651.*

| Diagrama de proceso T-651 | N° | Variable                     | Descripción   |
|---------------------------|----|------------------------------|---|
|                           | 1  | FLUJO DE CARGA               | Corresponde al flujo que es alimentado a la torre T-651.  |
|                           | 2  | REFLUJO DE CIMA              | Es cantidad del flujo que retorna del condensador a la torre T-651.                                     |
|                           | 3  | PRODUCCION DE CIMA           | Hace referencia a la cantidad de flujo que sale del sistema de destilación.                             |
|                           | 4  | PRESION DE CIMA              | Corresponde a la presión que presenta la torre en el plato #1, el cual se encuentra en la cima de esta. |
|                           | 5  | TEMPERATURA ENTRADA DE CARGA | Es la temperatura a la cual entra el alimento que es cargado a la torre T-651.                          |
|                           | 6  | TEMPERATURA DE CIMA          | Es la temperatura a la cual sale producto de la cima de la torre T-651.                                 |

| Diagrama de proceso T-651 | N° | Variable                                      | Descripción   |
|---------------------------|----|---|---|
|                           | 7  | TEMPERATURA<br>DEL PLATO 50                   | Hace referencia a la temperatura presente en el último plato de la torre, o plato en el fondo de esta.                                  |
|                           | 8  | TEMPERATURA<br>DE FONDO                       | Corresponde a la temperatura presente en la parte más baja de la torre o fondo.   |
|                           | 9  | FLUJO DE<br>VAPOR AL<br>REHERVIDOR            | Es la cantidad de flujo de vapor que pasa por el rehervidor el cual es el encargado de aumentar la temperatura en el fondo de la torre. |
|                           | 10 | TEMPERATURA<br>DE SALIDA<br>DEL<br>REHERVIDOR | Temperatura presente en el rehervidor de la torre de destilación.   |

Es de resaltar que, los datos obtenidos del aplicativo fueron tomados cada minuto durante todo el periodo en estudio. Por otra parte, los datos de los parámetros de calidad del Disolvente 4 fueron obtenidos de los históricos del laboratorio, los cuales son realizados a diario entre las 18:00 y 20:00 horas como control de calidad de la planta.

Estos datos fueron analizados y filtrados teniendo en cuenta los días en que la torre se encontraba operando en condiciones de producción de disolvente 4, también se descartaron los días donde se evidencia cambios en la operación de la torre.

**Figura 2.**

*Comportamiento de las variables del proceso obtenidas para el año 2020.*



### 3.1.2 Análisis estadístico multivariable.

Con el fin de realizar este análisis, se llevó a cabo la preparación de los datos de acuerdo con el siguiente paso a paso:

- Filtrado de datos históricos donde se seleccionó aquellos puntos donde el balance de masa (flujo de carga menos flujos de salida de la torre) presentaba un error menor al 10%, ya que en estos es posible decir que la torre se encontraba en condiciones estables.

- Filtrado de datos que se encontraban dentro del rango horario de toma de muestra de calidad del laboratorio.

- Se promedió los datos filtrados anteriormente con el fin de obtener solo un dato por día, tal y como se tenía para los parámetros de calidad del laboratorio, y así poder establecer un modelo que predijera los resultados del laboratorio y el flujo de producción de Disolvente 4 a partir de los datos del proceso.

A continuación, se usó el método de mínimos cuadrados para calcular modelos predictivos para las variables de calidad (PIE, P seco y P inflamación) y flujo de producción a partir de las variables de entrada descritas en la Tabla 1. Inicialmente se realizaron las regresiones desde el primer orden hasta el orden cuatro con el fin de determinar en cual se obtenía el mejor ajuste, dando como resultado en el tercer orden, tal como se muestra en la Tabla 2. Los modelos de regresión grado uno y tres obtenidos se relacionan en la Tabla 3 y, además, los comportamientos de los datos históricos con su respectivo ajuste modelado para cada una de las variables de calidad y flujo de producción se muestran en la Figura 3, donde también se evidencia el valor del coeficiente de correlación  $R^2$ . Este coeficiente de correlación nos indica que tan ajustado es el modelo de regresión al comportamiento real de la variable, por esta razón se determinó que la regresión de orden tres es la que mejor se ajusta al comportamiento de las variables en estudio.

**Tabla 2.**

*Coefficientes de correlación  $R^2$  para los distintos órdenes de regresión.*

| ORDEN | PIE    | Punto seco | Punto inflamación | Producción fondo |
|-------|--------|------------|-------------------|------------------|
| 1     | 0,6844 | 0,4485     | 0,6568            | 0,9625           |
| 2     | 0,7775 | 0,5219     | 0,7295            | 0,9690           |
| 3     | 0,7903 | 0,5884     | 0,7467            | 0,9757           |
| 4     | 0,2437 | 0,3501     | 0,3208            | 0,6296           |

**Tabla 3.**

*Modelos de regresión para los parámetros de calidad y flujo de producción de Disolvente 4 a partir de los datos de proceso obtenidos.*

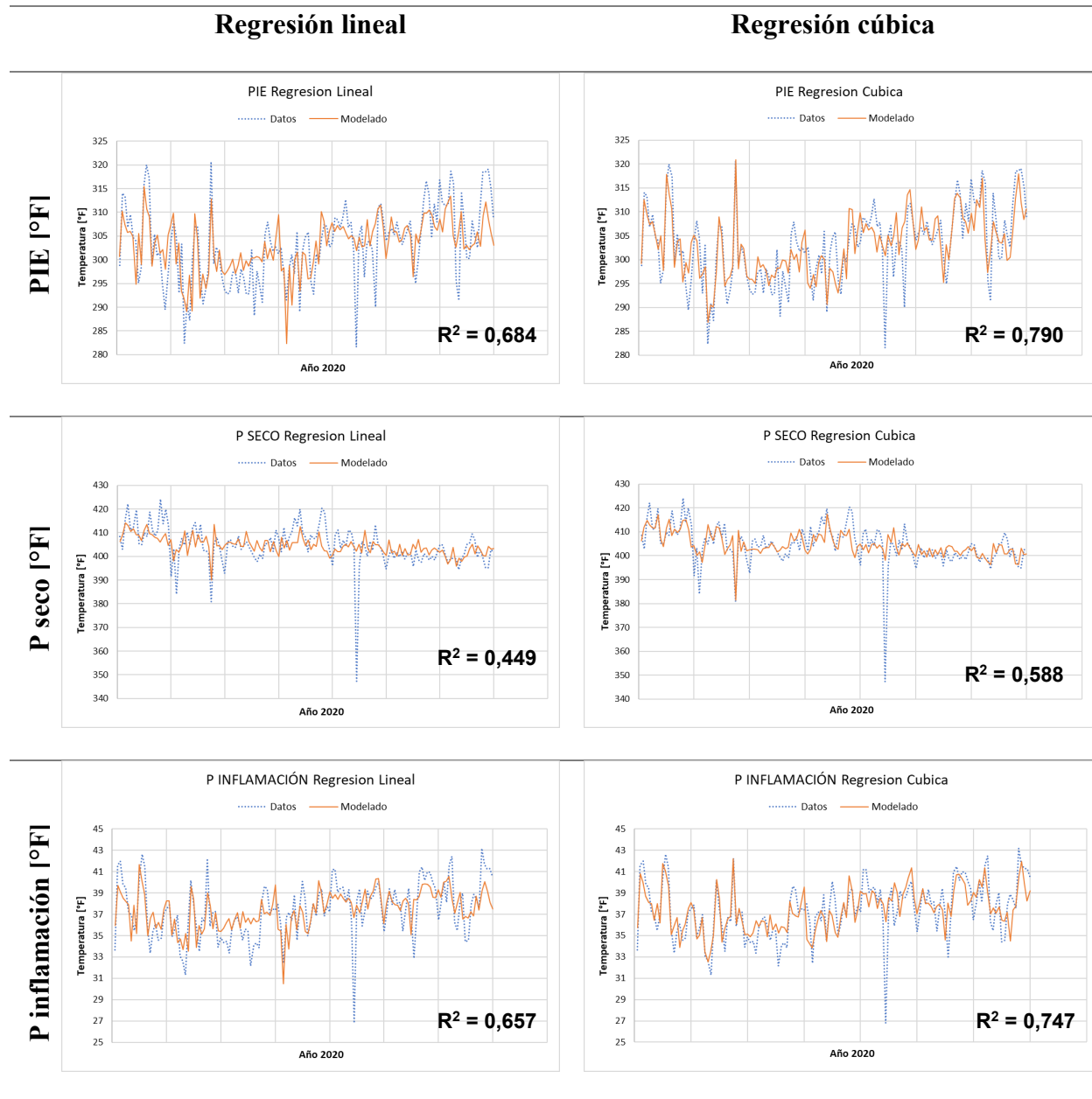
| COEFICIENTE               |    |     | REGRESIÓN LINEAL        |                         |                         |                         | REGRESIÓN CUBICA        |                         |                         |                         |
|---------------------------|----|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                           |    |     | PIE                     | Punto seco              | Punto inflamación       | Producción fondo        | PIE                     | Punto seco              | Punto inflamación       | Producción fondo        |
| <b>B0</b>                 | ^1 | B0  | 2,252*10 <sup>2</sup>   | 3,005*10 <sup>2</sup>   | 9,670*10 <sup>-1</sup>  | 3,881*10 <sup>2</sup>   | 2,874*10 <sup>4</sup>   | -1,365*10 <sup>4</sup>  | 1,614*10 <sup>4</sup>   | 4,560*10 <sup>5</sup>   |
| <b>FLUJO DE CARGA</b>     | ^1 | B1  | -3,565*10 <sup>-3</sup> | 1,270*10 <sup>-2</sup>  | -5,783*10 <sup>-4</sup> | 4,468*10 <sup>-1</sup>  | -8,159*10 <sup>-2</sup> | -8,411*10 <sup>-1</sup> | -1,094*10 <sup>-1</sup> | 4,664                   |
|                           | ^2 | B2  | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | 4,668*10 <sup>-5</sup>  | 5,622*10 <sup>-4</sup>  | 6,636*10 <sup>-5</sup>  | -2,953*10 <sup>-3</sup> |
|                           | ^3 | B3  | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | -1,073*10 <sup>-8</sup> | -1,213*10 <sup>-7</sup> | -1,351*10 <sup>-8</sup> | 6,859*10 <sup>-7</sup>  |
| <b>REFLUJO DE CIMA</b>    | ^1 | B4  | -6,286*10 <sup>-3</sup> | 5,754*10 <sup>-3</sup>  | -3,602*10 <sup>-3</sup> | -2,233*10 <sup>-2</sup> | 1,049*10 <sup>-1</sup>  | 1,762*10 <sup>-1</sup>  | -1,269*10 <sup>-3</sup> | -2,988*10 <sup>-2</sup> |
|                           | ^2 | B5  | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | -8,114*10 <sup>-5</sup> | -2,781*10 <sup>-4</sup> | 4,162*10 <sup>-6</sup>  | -2,064*10 <sup>-4</sup> |
|                           | ^3 | B6  | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | 1,432*10 <sup>-8</sup>  | 1,332*10 <sup>-7</sup>  | -4,086*10 <sup>-9</sup> | 1,346*10 <sup>-7</sup>  |
| <b>PRODUCCION DE CIMA</b> | ^1 | B7  | 7,485*10 <sup>-3</sup>  | -1,076*10 <sup>-2</sup> | 6,202*10 <sup>-4</sup>  | -2,184*10 <sup>-1</sup> | 1,522*10 <sup>-1</sup>  | -2,855*10 <sup>-2</sup> | 8,048*10 <sup>-2</sup>  | -1,183                  |
|                           | ^2 | B8  | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | -8,687*10 <sup>-5</sup> | 3,498*10 <sup>-5</sup>  | -6,697*10 <sup>-5</sup> | 7,241*10 <sup>-4</sup>  |
|                           | ^3 | B9  | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | 1,299*10 <sup>-8</sup>  | -1,737*10 <sup>-8</sup> | 1,854*10 <sup>-8</sup>  | -1,729*10 <sup>-7</sup> |
| <b>PRESION DE CIMA</b>    | ^1 | B10 | -1,513                  | -5,641*10 <sup>-1</sup> | -6,056*10 <sup>-1</sup> | 7,808                   | 5,378                   | 4,958                   | -3,693                  | -3,142*10 <sup>1</sup>  |
|                           | ^2 | B11 | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | -8,577*10 <sup>-1</sup> | -9,154*10 <sup>-1</sup> | 3,301*10 <sup>-1</sup>  | 4,949                   |
|                           | ^3 | B12 | ---                     | ---                     | ---                     | ---                     | 3,245*10 <sup>-2</sup>  | 4,153*10 <sup>-2</sup>  | -1,147*10 <sup>-2</sup> | -1,957*10 <sup>-1</sup> |
|                           | ^1 | B13 | -1,333*10 <sup>-1</sup> | -1,286*10 <sup>-1</sup> | -4,914*10 <sup>-2</sup> | 4,273                   | 8,351*10 <sup>1</sup>   | -3,917*10 <sup>-2</sup> | 4,276*10 <sup>1</sup>   | 2,592*10 <sup>2</sup>   |

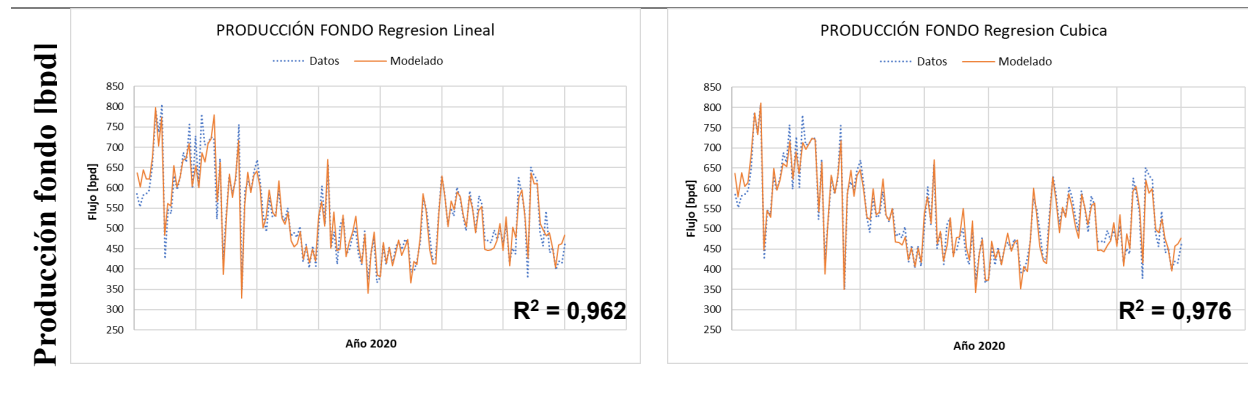
| COEFICIENTE                  |    |     | REGRESIÓN LINEAL       |                        |                        |                        | REGRESIÓN CUBICA        |                        |                        |                        |
|------------------------------|----|-----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                              |    |     | PIE                    | Punto seco             | Punto inflamación      | Producción fondo       | PIE                     | Punto seco             | Punto inflamación      | Producción fondo       |
| TEMPERATURA                  | ^2 | B14 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $-4,220 \cdot 10^{-1}$  | $-2,255 \cdot 10^{-3}$ | $-2,095 \cdot 10^{-1}$ | -1,225                 |
|                              | ^3 | B15 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $7,075 \cdot 10^{-4}$   | $6,682 \cdot 10^{-6}$  | $3,418 \cdot 10^{-4}$  | $1,956 \cdot 10^{-3}$  |
| ENTRADA DE CARGA             | ^1 | B16 | $1,975 \cdot 10^{-1}$  | $-4,104 \cdot 10^{-1}$ | $2,812 \cdot 10^{-2}$  | $-7,655 \cdot 10^{-1}$ | $-2,794 \cdot 10^1$     | $-7,828 \cdot 10^1$    | 3,191                  | -8,578                 |
|                              | ^2 | B17 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $1,222 \cdot 10^{-1}$   | $3,622 \cdot 10^{-1}$  | $-1,737 \cdot 10^{-2}$ | $8,132 \cdot 10^{-2}$  |
|                              | ^3 | B18 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $-1,772 \cdot 10^{-4}$  | $-5,585 \cdot 10^{-4}$ | $3,063 \cdot 10^{-5}$  | $-1,866 \cdot 10^{-4}$ |
| TEMPERATURA DE CIMA          | ^1 | B19 | $-2,916 \cdot 10^{-2}$ | $-2,128 \cdot 10^{-1}$ | $-2,783 \cdot 10^{-3}$ | $-7,202 \cdot 10^{-1}$ | $1,077 \cdot 10^3$      | $-3,861 \cdot 10^2$    | $3,003 \cdot 10^2$     | $5,033 \cdot 10^3$     |
|                              | ^2 | B20 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | -2,962                  | 1,079                  | $-8,197 \cdot 10^{-1}$ | $-1,397 \cdot 10^1$    |
|                              | ^3 | B21 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $2,714 \cdot 10^{-3}$   | $-1,005 \cdot 10^{-3}$ | $7,456 \cdot 10^{-4}$  | $1,292 \cdot 10^{-2}$  |
| TEMPERATURA DEL PLATO 50     | ^1 | B22 | $1,862 \cdot 10^{-1}$  | $3,891 \cdot 10^{-1}$  | $4,348 \cdot 10^{-2}$  | $-7,802 \cdot 10^{-1}$ | $-5,028 \cdot 10^2$     | $-8,514 \cdot 10^1$    | $2,436 \cdot 10^1$     | $-1,259 \cdot 10^4$    |
|                              | ^2 | B23 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | 1,296                   | $2,077 \cdot 10^{-1}$  | $-9,453 \cdot 10^{-2}$ | $3,399 \cdot 10^1$     |
|                              | ^3 | B24 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $-1,110 \cdot 10^{-3}$  | $-1,666 \cdot 10^{-4}$ | $1,109 \cdot 10^{-4}$  | $-3,059 \cdot 10^{-2}$ |
| TEMPERATURA DE FONDO         | ^1 | B25 | $2,558 \cdot 10^{-3}$  | $-3,053 \cdot 10^{-3}$ | $8,015 \cdot 10^{-4}$  | $-1,417 \cdot 10^{-3}$ | $-6,786 \cdot 10^{-2}$  | $5,655 \cdot 10^{-2}$  | $4,280 \cdot 10^{-3}$  | 1,501                  |
|                              | ^2 | B26 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $1,355 \cdot 10^{-5}$   | $-1,160 \cdot 10^{-5}$ | $-1,141 \cdot 10^{-6}$ | $-3,130 \cdot 10^{-4}$ |
|                              | ^3 | B27 | ---                    | ---                    | ---                    | ---                    | $-8,683 \cdot 10^{-10}$ | $7,474 \cdot 10^{-10}$ | $1,057 \cdot 10^{-10}$ | $2,142 \cdot 10^{-8}$  |
| FLUJO DE VAPOR AL REHERVIDOR | ^1 | B28 | $2,196 \cdot 10^{-2}$  | $4,253 \cdot 10^{-1}$  | $7,964 \cdot 10^{-2}$  | -1,325                 | $-7,999 \cdot 10^2$     | $6,233 \cdot 10^2$     | $-4,671 \cdot 10^2$    | $3,807 \cdot 10^3$     |

| COEFICIENTE              |                   | REGRESIÓN LINEAL |            |                   |                  | REGRESIÓN CUBICA        |                        |                         |                        |
|--------------------------|-------------------|------------------|------------|-------------------|------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
|                          |                   | PIE              | Punto seco | Punto inflamación | Producción fondo | PIE                     | Punto seco             | Punto inflamación       | Producción fondo       |
| TEMPERATURA              | <sup>^2</sup> B29 | ---              | ---        | ---               | ---              | 2,186                   | -1,669                 | 1,264                   | -1,024*10 <sup>1</sup> |
| DE SALIDA DEL REHERVIDOR | <sup>^3</sup> B30 | ---              | ---        | ---               | ---              | -1,989*10 <sup>-3</sup> | 1,489*10 <sup>-3</sup> | -1,139*10 <sup>-3</sup> | 9,188*10 <sup>-3</sup> |

**Figura 3.**

*Comparativo del comportamiento de los modelos de regresión con los datos obtenidos de proceso.*





Es posible evidenciar que, de manera general, para las variables de calidad los modelos de ajuste presentan un coeficiente de correlación  $R^2$  por debajo de 0,90, debido a que las variables del proceso analizadas no son los únicos parámetros que repercuten en estas. Lo anterior se puede relacionar a que no se está teniendo en cuenta variables que conciernen a la naturaleza química del alimento (composición química) tal como algunos estudios lo han demostrado (Jaimes Figueroa & Suárez Jaimes, 2008). No obstante, el modelo de orden tres presenta ligeramente una mejoría en el ajuste. Por consiguiente, y con el fin de hallar las variables que más influyen en los resultados de los parámetros de calidad y de producción del D4 del modelado se hizo necesario la estandarización de las variables de entrada de acuerdo con la Ecuación 1.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 1}$$

Una vez estandarizadas las variables, se volvió a calcular los coeficientes de la regresión de tercer orden, donde mediante tonalidad de colores verde y rojo se determinó su incidencia en las variables de salida, siendo así, que los coeficientes de tonalidad verde son los de mayor incidencia positiva, mientras que los de tonalidad roja los de mayor incidencia negativa, tal como

se muestra en la Tabla 4, también podemos observar en la tabla valores con tonalidad blanca, estos valores tienen muy poca incidencia en el comportamiento de las variables.




De esta manera fue posible determinar cuáles son las variables que más aportan al modelo y que tienen una incidencia alta en el comportamiento de las variables de calidad y de producción del Disolvente 4, las cuales serán tomadas para continuar con los diferentes análisis en las siguientes etapas del presente trabajo.

**Tabla 4.**

*Selección de variables de mayor influencia según el modelo de tercer orden.*

| COEFICIENTE               |               |     | REGRESIÓN CÚBICA ESTANDARIZADA |            |                   |                  |
|---------------------------|---------------|-----|--------------------------------|------------|-------------------|------------------|
|                           |               |     | PIE                            | Punto seco | Punto inflamación | Producción fondo |
| <b>B0</b>                 | <sup>^1</sup> | B0  | -0,0011                        | -0,3290    | -0,1710           | 0,0239           |
|                           | <sup>^1</sup> | B1  | -0,4170                        | 0,4694     | -0,3386           | 1,0594           |
|                           | <sup>^2</sup> | B2  | 0,0300                         | 0,4691     | 0,2476            | -0,0823          |
| <b>FLUJO DE CARGA</b>     | <sup>^3</sup> | B3  | -0,0256                        | -0,2149    | -0,0751           | 0,0971           |
|                           | <sup>^1</sup> | B4  | 0,1341                         | -0,2911    | -0,1082           | -0,1673          |
|                           | <sup>^2</sup> | B5  | -0,1327                        | 0,0589     | -0,0410           | 0,0215           |
| <b>REFLUJO DE CIMA</b>    | <sup>^3</sup> | B6  | 0,0063                         | 0,0525     | -0,0049           | 0,0045           |
|                           | <sup>^1</sup> | B7  | 0,7747                         | -0,1395    | 0,5149            | -0,6038          |
|                           | <sup>^2</sup> | B8  | -0,2261                        | -0,0454    | -0,2527           | 0,0911           |
| <b>PRODUCCION DE CIMA</b> | <sup>^3</sup> | B9  | 0,0135                         | -0,0059    | 0,0405            | -0,0090          |
|                           | <sup>^1</sup> | B10 | -0,4870                        | -0,2933    | -0,3631           | 0,1831           |
|                           | <sup>^2</sup> | B11 | 0,0111                         | 0,0853     | 0,0212            | -0,0130          |
| <b>PRESION DE CIMA</b>    | <sup>^3</sup> | B12 | 0,0232                         | 0,0283     | -0,0263           | -0,0119          |
|                           | <sup>^1</sup> | B13 | -0,1818                        | -0,1163    | -0,1195           | 0,3296           |

| COEFICIENTE                          |        | REGRESIÓN CÚBICA ESTANDARIZADA |         |             |            |  |
|--------------------------------------|--------|--------------------------------|---------|-------------|------------|--|
|                                      |        | PIE                            | Punto   | Punto       | Producción |  |
|                                      |        |                                | seco    | inflamación | fondo      |  |
| TEMPERATURA DE ENTRADA DE CARGA      | ^2 B14 | 0,2341                         | 0,0231  | 0,1539      | 0,0013     |  |
|                                      | ^3 B15 | 0,0715                         | 0,0014  | 0,1034      | 0,0158     |  |
| TEMPERATURA DE CIMA                  | ^1 B16 | 0,1085                         | -0,0942 | 0,0642      | -0,0177    |  |
|                                      | ^2 B17 | 0,0278                         | -0,1036 | 0,0828      | -0,0300    |  |
|                                      | ^3 B18 | -0,0128                        | -0,0380 | 0,0065      | -0,0011    |  |
| TEMPERATURA DEL PLATO 50             | ^1 B19 | -0,2194                        | -0,0568 | -0,3557     | -0,1622    |  |
|                                      | ^2 B20 | 0,0602                         | -0,1083 | -0,0471     | 0,0769     |  |
|                                      | ^3 B21 | 0,0939                         | -0,0322 | 0,0775      | 0,0357     |  |
| TEMPERATURA DE FONDO                 | ^1 B22 | 0,3657                         | 0,2519  | 0,4194      | -0,0386    |  |
|                                      | ^2 B23 | 0,2439                         | 0,0970  | 0,4429      | -0,1361    |  |
|                                      | ^3 B24 | -0,0348                        | -0,0055 | 0,0101      | -0,0759    |  |
| FLUJO DE VAPOR AL REHERVIDOR         | ^1 B25 | 0,0866                         | -0,1746 | 0,0957      | -0,0718    |  |
|                                      | ^2 B26 | 0,1007                         | -0,0803 | 0,0411      | -0,1125    |  |
|                                      | ^3 B27 | -0,0283                        | 0,0234  | 0,0105      | 0,0562     |  |
| TEMPERATURA DE SALIDA DEL REHERVIDOR | ^1 B28 | 0,1695                         | -0,0072 | 0,4147      | 0,0560     |  |
|                                      | ^2 B29 | -0,4057                        | 0,1132  | -0,4919     | 0,0833     |  |
|                                      | ^3 B30 | -0,0767                        | 0,0549  | -0,1325     | 0,0284     |  |

|   |  |
|---|--|
|  | Valores de mayor influencia negativa       |
|  | Valores sobre el promedio (sin influencia) |
|  | Valores de mayor influencia positiva       |

Con respecto a la tabla anterior, y considerando que el objetivo del presente trabajo es optimizar la producción del Disolvente 4, las variables de mayor a menor incidencia se presentan

en la Tabla 5, donde, a su vez, se da una observación teniendo en cuenta el conocimiento de la planta y la experiencia en campo.

**Tabla 5.**

*Selección de variables manipulables y rango de manipulación.*

| VARIABLE                                    | OBSERVACIÓN   | MANIPULABLE  |
|---|---|--|
| <b>Flujo de Carga</b>                       | Variable que depende de la producción de la planta U200 y varía dependiendo de la demanda de producto del mercado (Disolvente 4).   | Sí, se evaluarán 3 escenarios de carga (mín., prom., máx.) |
| <b>Producción de cima</b>                   | Debido a la topología del proceso, esta variable se encuentra directamente enlazada con el reflujo de cima, por tanto, en planta dependen de la misma variable manipulada (tasa de reflujo).    | No, se manipula de forma indirecta con el reflujo de cima  |
| <b>Temperatura de Entrada de carga</b>      | Variable que es función de una integración energética en planta y no posee sistema de control.  | No   |
| <b>Temperatura De fondo</b>                 | Variables que, en campo, solo poseen un sistema de control que controla la temperatura del rehervidor   | No   |
| <b>Temperatura de salida del Rehervidor</b> | manipulando el flujo de vapor que atraviesa el mismo.   | Sí   |
| <b>Presión de cima</b>                      | Variable que no representa incidencia significativa en la producción de D4.   | No   |
| <b>Reflujo de cima</b>                      | Debido a la topología del proceso, esta variable se encuentra directamente enlazada con la producción de cima, por tanto, en planta dependen de la misma variable manipulada (tasa de reflujo). | Sí   |
| <b>Flujo de vapor al rehervidor</b>         | Variable utilizada para lazo de control de temperatura en el rehervidor.  | No   |

| VARIABLE                                  | OBSERVACIÓN  | MANIPULABLE |
|---|--|-------------|
| <b>Temperatura del Plato</b><br><b>50</b> | Variable que se encuentra directamente relacionada con la temperatura del rehervidor que no posee lazo de control. | No          |
| <b>Temperatura de cima</b>                | Variable que no representa incidencia significativa en la producción de D4.  | No          |

De acuerdo con lo anterior, las variables que se manipularán en la optimización de la planta serán: flujo de carga, reflujo de cima y temperatura del rehervidor. Adicionalmente, por especificaciones de diseño, la torre T-651 posee tres platos de alimentación que se encuentran en los platos 25, 35 y 41 (ver Apéndice A); por tanto, estos también serán tenidos en cuenta al momento de realizar la optimización.

### 3.2 Simulación y validación del proceso

#### 3.2.1 Simulación en estado estacionario EE.

Usando el software de simulación de procesos Aspen HYSYS se realizó el montaje del diagrama de flujo de proceso de la siguiente manera:

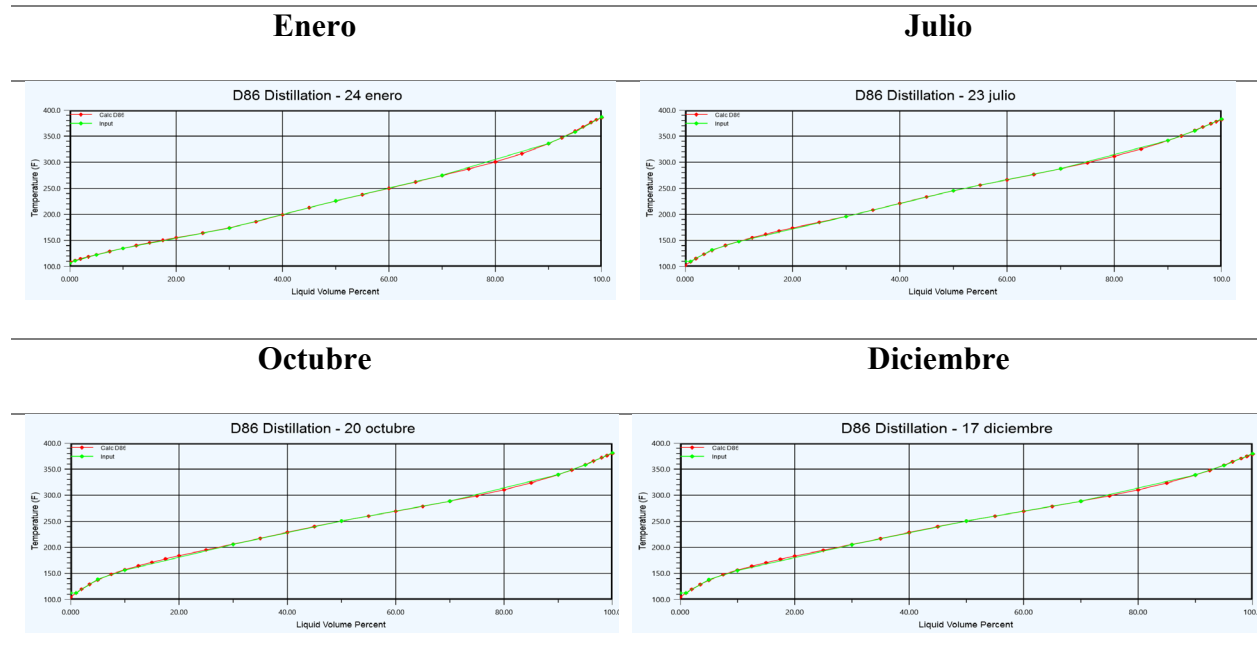
- Asignación del paquete de fluidos que simule adecuadamente compuestos de hidrocarburos en procesos de separación (Peng Robinson).

- Montaje de las corrientes de hidrocarburos usando la herramienta “Oil Manager” del simulador Aspen HYSYS mediante los análisis de resultados de laboratorio bajo la norma ASTM D86. Los Assays de naftas de carga y los datos de operación se encuentran en el Apéndice B. En

la Figura 4 se muestran algunos de los resultados de las curvas de destilación obtenidas en el simulador.

**Figura 4.**

*Curvas de destilación de los Assays de carga año 2020.*

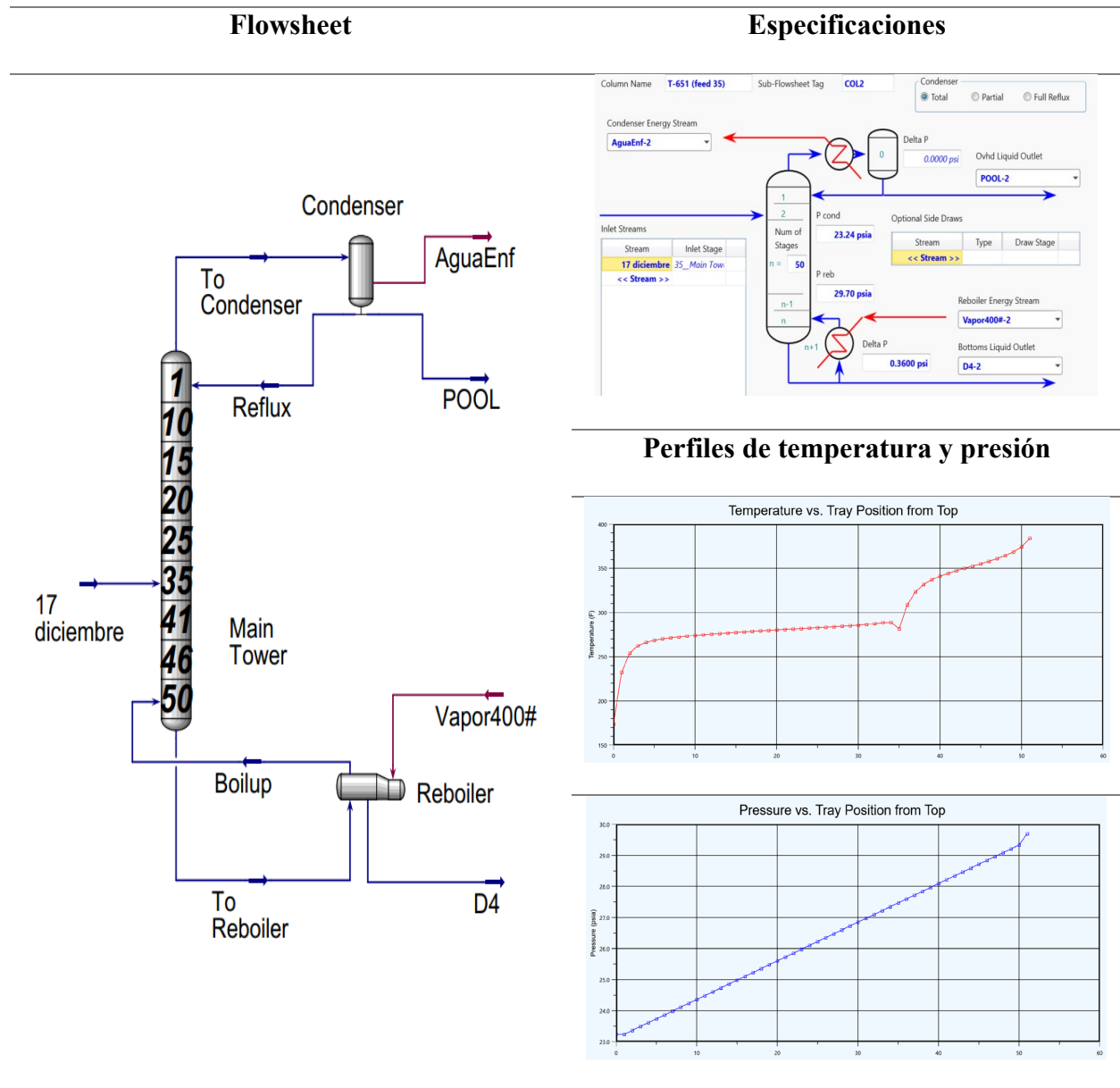


- Montaje de los equipos e instrumentos del proceso que se muestran en la Tabla 1, comprendido por la torre T-651, que se especificó de acuerdo con la datasheet mostrada en el Apéndice A. Es de resaltar, que las especificaciones de proceso para completar los grados de libertad de la simulación fueron la tasa de reflujo y la temperatura salida del rehervidor.

De acuerdo con todo lo anterior, en la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo del proceso (Flowsheet) montado en Aspen HYSYS, así como las especificaciones y los perfiles de temperatura y presión al correr la simulación y converger correctamente.

**Figura 5.**

*Flowsheet, especificaciones y perfiles de la torre T-651.*



### 3.2.2 Validación de la simulación en EE.

Se utilizaron los datos depurados de las variables del proceso realizado en el análisis estadístico. Para el caso de los datos de carga (curvas de destilación del alimento) se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Fechas de carga donde las variables del proceso presentaban un error menor al 10% en el balance de masa.
- Fechas donde los datos de las curvas de destilación se encontraban con la mínima desviación estándar del mes, tal como se presenta en el Apéndice B.

Una vez obtenidos los datos depurados, la validación de la simulación se llevó a cabo teniendo en cuenta las variables de entrada de usuario, el plato de alimentación (plato 35) y las variables de salida de la simulación. Es de tener en cuenta que, para validar la simulación fue necesario el cálculo del error de las variables de salida obtenidas con la simulación respecto a los valores históricos depurados. Se tuvo como variables de salida el flujo de vapor del rehervidor, la producción de cima, las temperaturas de cima, temperatura del plato 50 y del fondo, la producción del fondo y los parámetros de calidad (PIE, P seco y punto inflamación). El error calculado fue el relativo, que se muestra en la Ecuación 2.




$$\% e_{rel} = \frac{|Valor_{histórico} - Valor_{simulado}|}{Valor_{histórico}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Por otra parte, a partir del error calculado se establecieron tres rangos de validación de la simulación, que se muestran en la Tabla 6. Dichos valores fueron determinados a criterio del

usuario teniendo en cuenta la norma ASME V&V 20 (Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer), donde recomienda que para simulaciones de procesos se tiene como valor de aceptación hasta un 20% de error.

**Tabla 6.**

*Criterios de validación de la simulación.*

| Criterio             | Valoración de la simulación | Semaforización  |
|----------------------|-----------------------------|---|
| $0 \leq \%e \leq 10$ | Aceptable                   |  |
| $10 < \%e \leq 20$   | Aceptable con advertencia   |  |
| $\%e > 20$           | No aceptable                |  |

Por consiguiente, en la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos al realizar el proceso de la validación de la simulación en EE durante el año de estudio, donde es posible observar que, de manera general la validación se encuentra dentro de los rangos de aceptación establecidos.

Tabla 7.

Validación mensual de la simulación en EE.

| VALIDACIÓN MENSUAL EN EE AÑO 2020 |  | 24/01/2020 | 9/02/2020 | 30/06/2020 | 23/07/2020 | 15/08/2020 | 29/09/2020 | 20/10/2020 | 29/11/2020 | 17/12/2020 |        |      |       |      |       |      |       |      |       |
|-----------------------------------|--|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Variables de entrada              | Flujo CARGA FT-6501 [bpd]                            | Histórico  | 1837,0    | 1809,7     | 1304,6     | 1147,2     | 1102,7     | 1424,8     | 1309,4     | 1540,4     | 1319,6 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | TEMP. ENTRADA DE CARGA TI-REFLUJO CIMA FT-6503 [bpd] | Histórico  | 206,9     | 202,8      | 221,5      | 205,6      | 212,8      | 204,5      | 212,3      | 214,8      | 207,5  |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | TEMP. REHERVIDOR TT-6501                             | Histórico  | 375,2     | 380,7      | 390,3      | 373,0      | 378,7      | 377,3      | 379,0      | 372,2      | 384,2  |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | PRESION CIMA PT-6501 [Psia]                          | Histórico  | 21,1      | 25,3       | 23,6       | 23,5       | 25,4       | 22,7       | 22,9       | 23,0       | 23,2   |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | FLUJO VAPOR REHERVIDOR FT-6505 [Lb/h]                | Histórico  | 4619,0    | 4687,1     | 3781,4     | 3859,0     | 3541,7     | 5008,8     | 4582,6     | 4203,0     | 4472,8 |      |       |      |       |      |       |      |       |
| Variables de salida               |  | Simulado   | 4619,0    | 4574,0     | 3553,0     | 3565,0     | 3354,0     | 4026,0     | 3502,0     | 3910,0     | 3800,0 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | %Error   | ✓          | 0,09      | ✓          | 2,41       | ✓          | 6,04       | ✓          | 7,62       | ✓          | 5,30   |      | 19,62 | ✗    | 23,58 | ✓    | 6,97  |      | 15,04 |
|                                   | PRODUCCION CIMA FT-6502 [bpd]                        | Histórico  | 1039,77   | 1280,05    | 715,80     | 684,67     | 626,06     | 932,96     | 805,89     | 1009,41    | 896,49 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   |  | Simulado   | 1201,00   | 1294,00    | 849,30     | 666,20     | 684,70     | 875,00     | 805,30     | 907,80     | 848,49 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | %Error   |            | 15,51     | ✓          | 1,09       |            | 18,65      | ✓          | 2,70       | ✓          | 9,37   | ✓    | 6,21  | ✓    | 0,07  |      | 10,07 | ✓    | 5,35  |
|                                   | TEMP. DE CIMA TT-6502 [°F]                           | Histórico  | 218,16    | 226,49     | 220,56     | 222,43     | 217,99     | 227,68     | 227,12     | 221,46     | 239,44 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   |  | Simulado   | 204,40    | 226,70     | 235,90     | 213,10     | 228,80     | 222,10     | 227,30     | 218,30     | 232,40 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | %Error   | ✓          | 6,31      | ✓          | 0,09       | ✓          | 6,96       | ✓          | 4,20       | ✓          | 4,96   | ✓    | 2,45  | ✓    | 0,08  | ✓    | 1,43  | ✓    | 2,94  |
|                                   | TEMP. PLATO 50 TI-650103 [°F]                        | Histórico  | 359,62    | 371,27     | 372,65     | 359,82     | 364,34     | 366,23     | 368,74     | 354,25     | 373,91 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   |  | Simulado   | 362,60    | 369,30     | 380,60     | 360,70     | 367,40     | 365,70     | 368,00     | 360,40     | 374,30 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | %Error   | ✓          | 0,83      | ✓          | 0,53       | ✓          | 2,13       | ✓          | 0,25       | ✓          | 0,84   | ✓    | 0,15  | ✓    | 0,20  | ✓    | 1,74  | ✓    | 0,10  |
|                                   | TEMP. DE FONDO TI-650102 [°F]                        | Histórico  | 375,23    | 380,71     | 390,26     | 372,95     | 378,70     | 377,29     | 379,04     | 372,23     | 384,25 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   |  | Simulado   | 375,00    | 380,00     | 390,00     | 372,00     | 378,00     | 377,00     | 379,00     | 372,00     | 384,00 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | %Error   | ✓          | 0,06      | ✓          | 0,19       | ✓          | 0,07       | ✓          | 0,26       | ✓          | 0,18   | ✓    | 0,08  | ✓    | 0,01  | ✓    | 0,06  | ✓    | 0,06  |
|                                   | PRODUCCION FONDO FT-6504 [bpd]                       | Histórico  | 651,93    | 598,27     | 595,40     | 477,60     | 480,08     | 493,93     | 495,32     | 620,90     | 452,57 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   |  | Simulado   | 635,50    | 516,20     | 455,30     | 481,00     | 418,00     | 549,70     | 504,10     | 632,60     | 471,40 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | %Error   | ✓          | 2,52      |            | 13,72      | ✗          | 23,53      | ✓          | 0,71       |            | 12,93  |      | 11,29 | ✓    | 1,77  | ✓    | 1,88  | ✓    | 4,16  |
|                                   | PIE [°F]   | Histórico  | 304,70    | 296,40     | 299,21     | 294,56     | 305,86     | 306,33     | 307,98     | 300,26     | 318,56 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   |  | Simulado   | 278,90    | 287,80     | 290,50     | 280,10     | 287,90     | 292,00     | 284,90     | 274,90     | 282,40 |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | %Error   | ✓          | 8,47      | ✓          | 2,90       | ✓          | 2,91       | ✓          | 4,91       | ✓          | 5,87   | ✓    | 4,68  | ✓    | 7,49  | ✓    | 8,45  |      | 11,35 |
| PSECO [°F]                        | Histórico  | 411,75     | 412,81    | 404,79     | 400,94     | 401,90     | 401,09     | 401,82     | 405,58     | 399,65     |        |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | Simulado   | 406,90     | 398,00    | 388,30     | 385,30     | 382,80     | 388,50     | 383,70     | 385,10     | 383,50     |        |      |       |      |       |      |       |      |       |
| %Error                            | ✓  | 1,18       | ✓         | 3,59       | ✓          | 4,07       | ✓          | 3,90       | ✓          | 4,75       | ✓      | 3,14 | ✓     | 4,51 | ✓     | 5,05 | ✓     | 4,04 |       |
| PUNTO INFLAMACION [°F]            | Histórico  | 99,16      | 98,90     | 96,59      | 93,78      | 101,35     | 99,77      | 103,01     | 94,21      | 109,75     |        |      |       |      |       |      |       |      |       |
|                                   | Simulado   | 89,64      | 101,20    | 104,50     | 93,55      | 94,02      | 95,78      | 94,97      | 93,29      | 100,10     |        |      |       |      |       |      |       |      |       |
| %Error                            | ✓  | 9,60       | ✓         | 2,33       | ✓          | 8,18       | ✓          | 0,25       | ✓          | 7,23       | ✓      | 4,00 | ✓     | 7,81 | ✓     | 0,97 | ✓     | 8,80 |       |

Asimismo, y con el fin de consolidar la información, en la Tabla 8 se presenta el error promedio consolidado de todos los meses de las variables de salida, mostrando que, el error promedio máximo fue de 9,63%.

Los resultados de error obtenidos anteriormente se pueden asociar a factores como al error en la medición de los sensores, el error en los ensayos de laboratorio de los parámetros de calidad del Disolvente 4 y, finalmente, el error debido al ensuciamiento en las tuberías del rehervidor y condensador, el desgaste en los platos de la torre (que no son tenidos en cuenta por el simulador) y el error asociado al cálculo en el equilibrio de las etapas de separación.

**Tabla 8.***Validación promedio consolidada de la simulación en EE.*

| <b>VALIDACIÓN MENSUAL EN EE AÑO 2020</b> |  | <b>% Error</b> |
|--|--|----------------|
| <b>Variables de salida</b>               | <b>FLUJO VAPOR REHERVIDOR FT-6505 [Lb/h]</b> | ✓ 9,63         |
|  | <b>PRODUCCION CIMA FT-6502 [bpd]</b>         | ✓ 7,67         |
|  | <b>TEMP. DE CIMA TT-6502 [°F]</b>            | ✓ 3,27         |
|  | <b>TEMP. PLATO 50 TI-650103 [°F]</b>         | ✓ 0,75         |
|  | <b>TEMP. DE FONDO TI-650102 [°F]</b>         | ✓ 0,11         |
|  | <b>PRODUCCION FONDO FT-6504 [bpd]</b>        | ✓ 8,06         |
|  | <b>PIE [°F]</b>                              | ✓ 6,34         |
|  | <b>PSECO [°F]</b>                            | ✓ 3,80         |
|  | <b>PUNTO INFLAMACION [°F]</b>                | ✓ 5,46         |

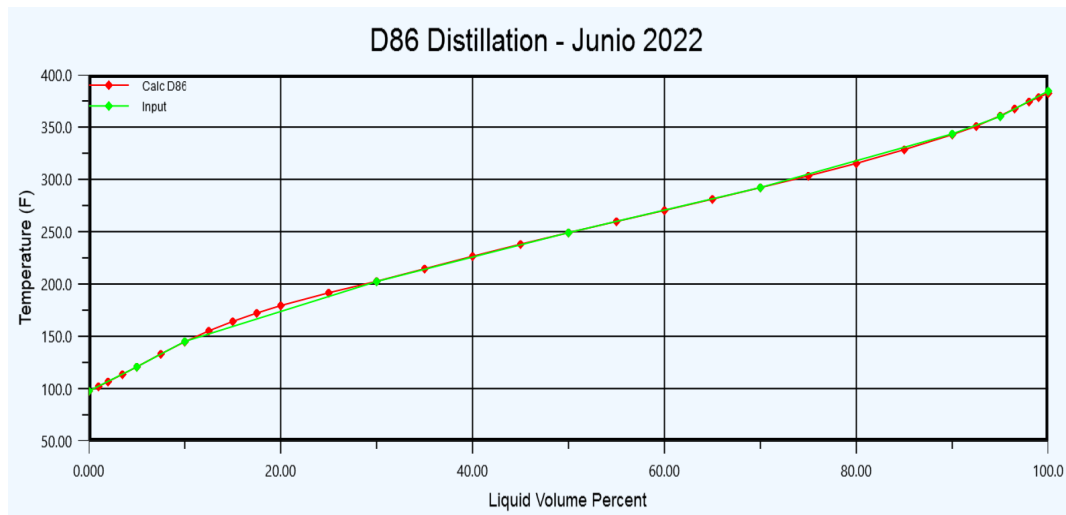
### 3.3 Estudio de sensibilidad

#### 3.3.1 Comportamiento del proceso en rangos de operación.

En esta sección, para llevar a cabo un estudio de sensibilidad más cercano a la realidad actual del proceso, se hizo necesario establecer un alimento más reciente que se viene trabajando en la planta. Por tanto, se tomaron los datos del mes de junio de 2022 los cuales se promediaron para establecer la curva de destilación que, posteriormente, alimentaría el simulador. La curva de destilación simulada junto con los datos reales se presenta en la Figura 6.

**Figura 6.**

*Curva de destilación del assay junio 2022.*



De igual manera, para alimentar el simulador, se tuvo en cuenta como variables fijas la temperatura de la carga y la presión de cima en 208,9 °F y 23,8 psia, respectivamente. Asimismo, se tomaron como variables manipulables las expuestas en el numeral 3.1.2, tales como el flujo de carga, el reflujo de cima, la temperatura del rehervidor y el plato de alimentación.

En la Tabla 9 vemos los parámetros de calidad del Disolvente 4 los cuales son las variables de salida de la simulación más el valor del flujo de producción del Disolvente 4.

**Tabla 9.**

*Valores permisibles de calidad del Disolvente 4 según ECOPETROL S.A.*

| Parámetro de calidad | Mínimo | Máximo |
|----------------------|--------|--------|
| PIE [°F]             | 289,90 | -      |
| P seco [°F]          | -      | 420,10 |
| P inflamación [°F]   | 89,90  | -      |

Con el fin de cumplir con los parámetros de calidad y poder observar el comportamiento general del proceso, los rangos convenientes para el análisis de sensibilidad se tomaron dentro de los valores establecidos en la Tabla 10 y se tomaron los tres platos de alimentación, plato 25, 35 y 41.

**Tabla 10.**

*Rangos para el análisis de sensibilidad.*

| Parámetro de control            | Mínimo | Máximo |
|---------------------------------|--------|--------|
| Temperatura del rehervidor [°F] | 350    | 400    |
| Reflujo de cima [bpd]           | 600    | 2800   |
| Flujo de carga [bpd]            | 1000   | 2000   |

A continuación, en la Figura 7 se observa la configuración que se ajustó en el simulador para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, este se realizó teniendo en cuenta que en la operación normal de la torre T-651, esta es cargada siempre por el plato 35 y también se tuvieron en cuenta los rangos de control que se tienen en las diferentes variables manipuladas del sistema de control de la torre T-651, con estos parámetros se evaluaron los diferentes casos de estudio realizados para poder determinar el modo de operación de la torre T-651 y así poder determinar la configuración del simulador para la siguiente etapa, que es la optimización del proceso de producción del Disolvente 4.

**Figura 7.**

*Configuración Case Study de Aspen HYSYS para plato de alimentación 35.*

| Name                                       | Tag | Current Value | Units      | Start | End   | Step Size | #Steps |
|--|-----|---------------|------------|-------|-------|-----------|--------|
| T-651 (feed 35) - Spec Value (Temperature) |     | 377.2         | F          | 350.0 | 400.0 | 1.000     | 51     |
| T-651 (feed 35) - Spec Value (Reflux Rate) |     | 1720          | barrel/day | 600.0 | 2800  | 100.0     | 23     |
| Junio 2022 - Std Ideal Liq Vol Flow        |     | 1000          | barrel/day | 1000  | 2000  | 500.0     | 3      |

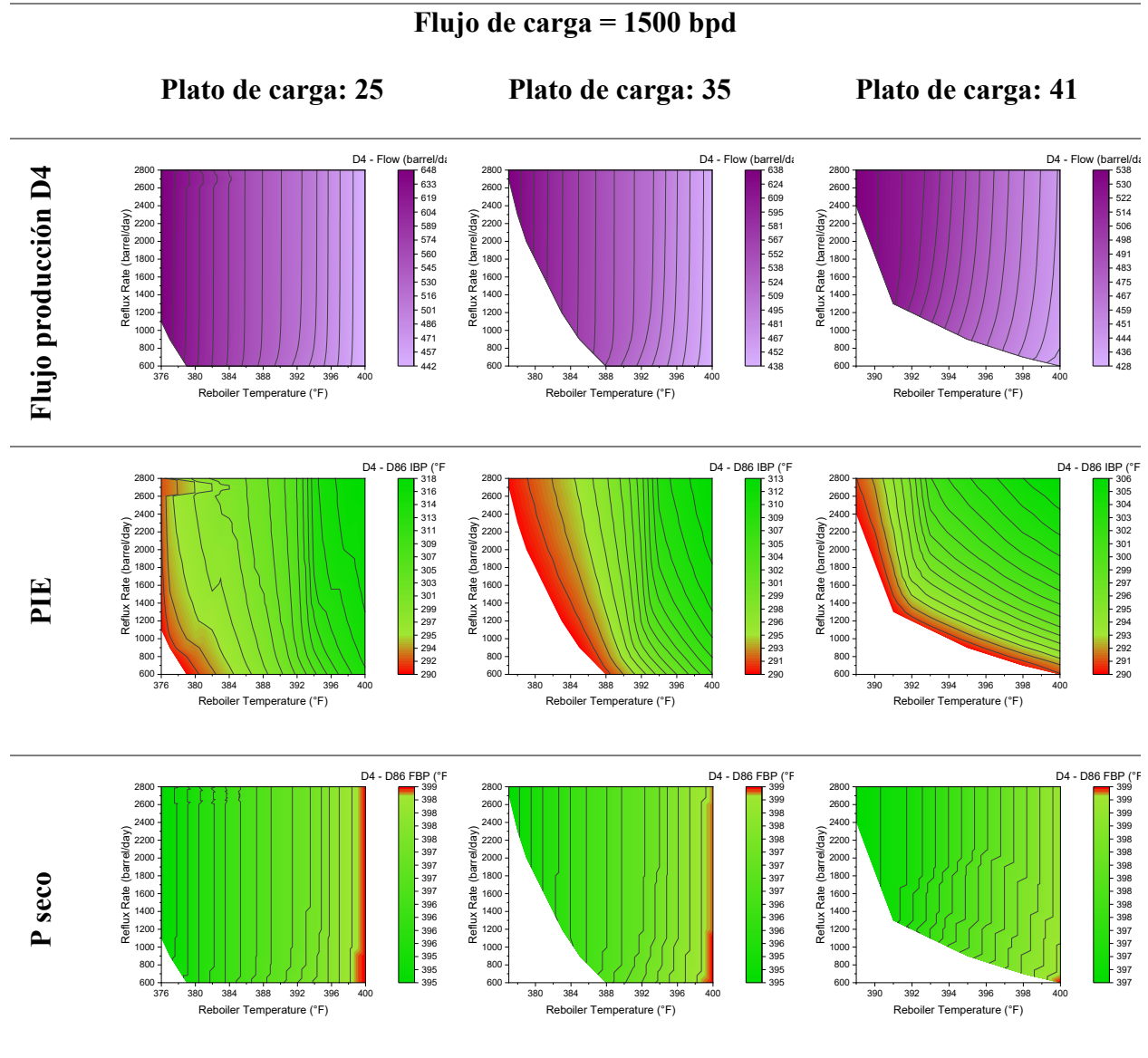
| Name  | Tag | Current Value | Units      | Delete |
|---|-----|---------------|------------|--------|
| 1 D4-2 - Std Ideal Liq Vol Flow                   |     | 423.6         | barrel/day | X      |
| 2 D4-2 - Petroleum Property (D86 IBP[Petrol])     |     | 289.9         | F          | X      |
| 3 D4-2 - Petroleum Property (D86 FBP[Petrol])     |     | 395.0         | F          | X      |
| 4 D4-2 - Petroleum Property (Flash Point[Petrol]) |     | 96.98         | F          | X      |

Los resultados obtenidos en el análisis realizado anteriormente dan como resultado 3519 posibles combinaciones de variables (número de casos), los cuales fueron graficados en el software Origin Pro-2021 en su versión trial. Cabe mencionar que, en el código de colores, el rojo representa las posibles combinaciones de datos de entrada en donde el Disolvente 4 obtenido se encuentra cerca al límite de los valores de calidad de cada parámetro, el verde representa las combinaciones donde se cumple adecuadamente la calidad y, las zonas en blanco, donde el producto que se obtiene se encuentra fuera de especificaciones de calidad, las franjas verticales a la derecha de las gráficas muestran los rangos en donde varía las variables de calidad y de producción del Disolvente 4 representadas en la gráfica principal por líneas continuas verticales.

Los gráficos de contorno que se muestran en la Figura 8 son los correspondientes al flujo de carga promedio (1500 bpd), mientras que para la carga mínima y máxima son mostrados en el Apéndice C, y presentan el mismo comportamiento que se muestra en la Figura 8, teniendo las mismas características.

**Figura 8.**

*Gráficos de contorno del estudio de sensibilidad para 1500 bpd de carga de alimento a diferentes platos de alimentación.*

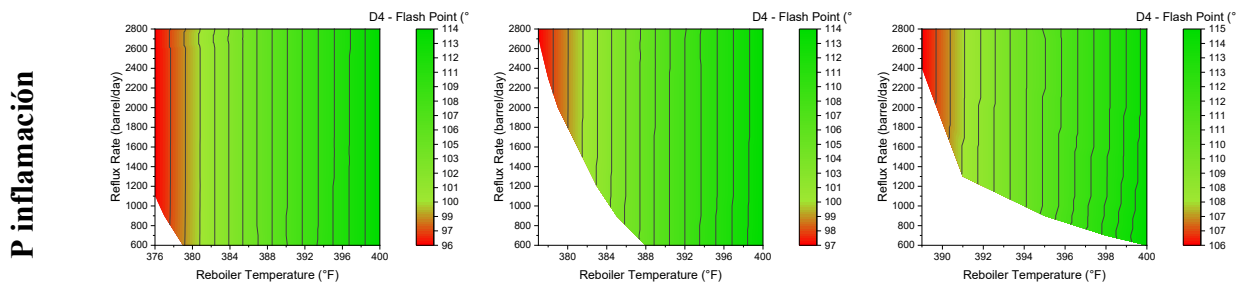


## Flujo de carga = 1500 bpd

Plato de carga: 25

Plato de carga: 35

Plato de carga: 41



Es de resaltar que, realizando un análisis detallado a las gráficas anteriores es posible evidenciar los siguientes aspectos:

- El parámetro de calidad que más delimita los rangos de operación de las variables manipuladas es el PIE.

- El parámetro de calidad del punto seco no restringe la calidad del producto, ya que, para que esto suceda, la curva de destilación del alimento debe encontrarse por encima de los 420,1 °F en su punto final. Asimismo, para este parámetro y para el punto de inflamación, no es un factor determinante el reflujo de cima.

- El mayor flujo de producción de D4 se da con menor temperatura del rehervidor y con la máxima tasa de reflujo de cima, independientemente del plato de alimentación.

- Para los parámetros de calidad, así como para la producción del Disolvente, los resultados muestran que a medida que el plato de alimentación se encuentra más cercano al fondo de la torre, esta presenta menos versatilidad en las variables de manipulación en campo con las cuales se puede obtener un producto dentro de la calidad requerida por la empresa.

- La producción de D4 disminuye cuando el alimento se carga más al fondo.

Todo lo anterior se debe a que el plato de alimentación limita la cantidad de etapas de enriquecimiento y empobrecimiento de la torre, por lo tanto, para el caso de la producción del Disolvente 4, el cual se obtiene por el fondo de la torre, es necesario una mayor cantidad de etapas de empobrecimiento que permita despojar, en gran medida, la cantidad de livianos presentes en la corriente de carga. Esto, además, permite trabajar a menor temperatura en el rehervidor sin necesidad de utilizar altos reflujos de cima para alcanzar un producto dentro de parámetros de calidad, dando así una mayor versatilidad de operación del proceso. Finalmente, teniendo en cuenta los resultados anteriores se hizo posible plantear la filosofía de optimización del proceso que se describe a continuación.

### ***3.3.2 Optimización del proceso.***

La optimización de operación de la torre T-651 se realizó con el soporte de Aspen HYSYS, la cual solicita los rangos de trabajo de las variables manipulables (que fueron los mismos usados en el análisis de sensibilidad), las ecuaciones de restricción que para el caso fueron los parámetros de calidad mostrados en la Tabla 9, y la función objetivo a optimizar.

En este sentido, se tuvo en cuenta dos enfoques de optimización, el primero fue maximizar la relación de producción (flujo de producción de D4 sobre flujo de carga), y la segunda fue maximizar la ganancia teniendo en cuenta el precio de venta del Disolvente 4, los precios del vapor y agua de enfriamiento usados en el rehervidor y el condensador, respectivamente, los cuales se relacionan en la Tabla 11.

**Tabla 11.***Tarifas industriales de la planta ECOPETROL S.A.*

| <b>Clases de costo</b> | <b>Unidad</b> | <b>Tarifa</b> |
|------------------------|---------------|---------------|
| Planta de agua         | USD \$/kGl    | 1,598         |
| Generación de vapor    | USD \$/kLb    | 15,860        |
| DisolventeD4           | USD \$/Gl     | 5,250         |

$$\text{Ganancia} = \text{Flujo D4} * \text{Precio venta D4} - \text{Flujo vapor} * \text{Costo vapor} - \text{Flujo agua} * \text{Costo agua}$$

Los resultados obtenidos una vez se corrieron las optimizaciones se presentan en la Tabla 12, donde se muestran las condiciones de trabajo óptimas de las variables manipulables, la relación de producción, ganancia y las condiciones de calidad del producto (que se encuentran dentro de lo exigido por ECOPETROL S.A.).

También se pudo determinar que al aumentar el plato de carga es necesario un mayor consumo de energía para la operación de la torre T-651, generando con esto una menor ganancia económica, se logró evidenciar que el plato de alimentación con mejor relación de producción, flujo de producción y ganancia fue el plato 25 para cualquier escenario, tal como ya se estimaba en el análisis de sensibilidad.

**Tabla 12.***Resultados de la optimización.*

|                            |   | Optimización de relación de<br>producción |                      |                      | Optimización de ganancia |                      |                      |
|----------------------------|---|---|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| PLATO DE<br>ALIMENTACIÓN:  |   | 25  | 35                   | 41                   | 25                       | 35                   | 41                   |
| Flujo de carga<br>1000 bpd | Reflujo de cima<br>[bpd]                        | 2800,0                                    | 2791,0               | 2799,0               | 656,0                    | 1720,0               | 884,3                |
|                            | Temperatura de<br>salida del<br>Rehervidor [°F] | 375,4                                     | 376,2                | 385,9                | 376,3                    | 377,2                | 390,9                |
|                            | Ganancia<br>[k USD\$/day]                       | 74,0                                      | 73,3                 | 59,5                 | 86,5                     | 78,4                 | 66,6                 |
|                            | Relación de<br>producción [%]                   | 43,5%                                     | 43,1%                | 37,3%                | 42,9%                    | 42,4%                | 34,9%                |
|                            | Flujo<br>producción<br>Disolvente 4<br>[bpd]    | 434,6                                     | 431,4                | 372,6                | 429,2                    | 423,6                | 349,4                |
|                            | Flujo de vapor<br>[lb/hr]                       | 7328                                      | 7339                 | 7554                 | 2918                     | 5134                 | 3592                 |
|                            | Flujo agua<br>enfriamiento<br>[lb/hr]           | 6,32*10 <sup>5</sup>                      | 6,33*10 <sup>5</sup> | 6,57*10 <sup>5</sup> | 2,33*10 <sup>5</sup>     | 4,34*10 <sup>5</sup> | 3,00*10 <sup>5</sup> |
|                            | PIE [°F]  | 289,9                                     | 289,8                | 290,0                | 289,9                    | 289,9                | 289,9                |
|                            | P seco [°F]                                     | 394,7                                     | 394,8                | 396,4                | 394,8                    | 395,0                | 397,1                |

|                            |   | Optimización de relación de<br>producción |                      |                      | Optimización de ganancia |                      |                      |
|----------------------------|---|---|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| Flujo de carga<br>1500 bpd | P inflamación<br>[°F]                           | 95,7                                      | 96,22                | 103,7                | 96,3                     | 97,0                 | 107,8                |
|                            | Reflujo de cima<br>[bpd]                        | 2800,0                                    | 2800,0               | 2800,0               | 981,6                    | 2526,0               | 2385,0               |
|                            | Temperatura de<br>salida del<br>Rehervidor [°F] | 375,5                                     | 376,8                | 388,2                | 376,3                    | 377,4                | 389,0                |
|                            | Ganancia<br>[k USD\$/day]                       | 119,8                                     | 117,2                | 94,5                 | 129,8                    | 117,6                | 96,0                 |
|                            | Relación de<br>producción [%]                   | 43,4%                                     | 42,7%                | 36,2%                | 42,9%                    | 42,3%                | 35,8%                |
|                            | Flujo<br>producción<br>Disolvente 4<br>[bpd]    | 651,0                                     | 640,2                | 542,3                | 644,0                    | 634,0                | 537,2                |
|                            | Flujo de vapor<br>[lb/hr]                       | 8108                                      | 8143                 | 8451                 | 4363                     | 7596                 | 7589                 |
|                            | Flujo agua<br>enfriamiento<br>[lb/hr]           | 6,87*10 <sup>5</sup>                      | 6,91*10 <sup>5</sup> | 7,25*10 <sup>5</sup> | 3,48*10 <sup>5</sup>     | 6,41*10 <sup>5</sup> | 6,48*10 <sup>5</sup> |
|                            | PIE [°F]  | 289,9                                     | 289,9                | 289,9                | 289,9                    | 289,9                | 289,9                |
|                            | P seco [°F]                                     | 394,7                                     | 394,9                | 396,8                | 394,8                    | 395,0                | 396,9                |
|                            | P inflamación<br>[°F]                           | 95,8                                      | 96,7                 | 105,6                | 96,3                     | 97,1                 | 106,2                |

|                            |   | Optimización de relación de<br>producción |                     |                      | Optimización de ganancia |                      |                      |
|----------------------------|---|---|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| Flujo de carga<br>2000 bpd | Reflujo de cima<br>[bpd]                        | 2800,0                                    | 2799,0              | 2800,0               | 1308,0                   | 2800,0               | 2384,0               |
|                            | Temperatura de<br>salida del<br>Rehervidor [°F] | 375,6                                     | 378,7               | 389,5                | 376,3                    | 378,6                | 389,0                |
|                            | Ganancia<br>[k USD\$/day]                       | 165,4                                     | 156,1               | 129,4                | 173,0                    | 156,3                | 133,2                |
|                            | Relación de<br>producción [%]                   | 43,4%                                     | 41,4%               | 35,8%                | 42,9%                    | 41,3%                | 35,5%                |
|                            | Flujo<br>producción<br>Disolvente 4<br>[bpd]    | 867,0                                     | 827,6               | 715,9                | 858,6                    | 826,9                | 711,5                |
|                            | Flujo de vapor<br>[lb/hr]                       | 8890                                      | 9009                | 9329                 | 5844                     | 9001                 | 8441                 |
|                            | Flujo agua<br>enfriamiento<br>[lb/hr]           | 7,42*10 <sup>5</sup>                      | 755*10 <sup>5</sup> | 7,93*10 <sup>5</sup> | 4,69*10 <sup>5</sup>     | 7,54*10 <sup>5</sup> | 7,12*10 <sup>5</sup> |
|                            | PIE [°F]  | 289,9                                     | 290,0               | 290,0                | 289,9                    | 289,9                | 288,2                |
|                            | P seco [°F]                                     | 394,7                                     | 395,3               | 396,9                | 394,8                    | 395,3                | 396,9                |
|                            | P inflamación<br>[°F]                           | 95,9                                      | 98,1                | 106,7                | 96,3                     | 98,1                 | 106,3                |

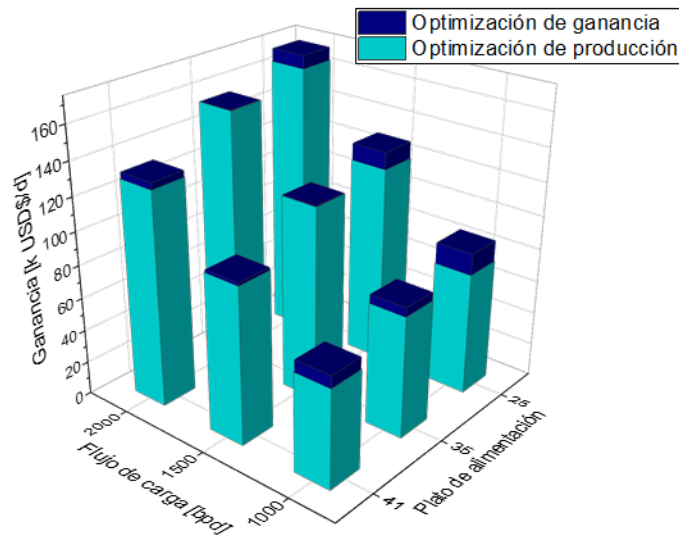
De igual manera, se puede observar que a medida que se incrementa el plato de alimentación se hace necesario utilizar mayor temperatura en el rehervidor con un mismo valor de

reflujo para el caso de la optimización de relación de producción y para el caso de la optimización de ganancia también es necesario una mayor temperatura en el rehervidor pero con un aumento en la tasa de reflujo respecto al plato 25, esto genera una disminución en la tasa de producción y en la ganancia obtenida, debido a que se incrementa el flujo de vapor y agua de enfriamiento en el rehervidor y en el condensador, respectivamente. Finalmente, las tendencias mencionadas se muestran gráficamente en la Figura 9, donde podemos evidenciar que podemos tener una mayor versatilidad en la operación con valores de producción de Disolvente 4 muy cercanos al óptimo y con una mayor ganancia.

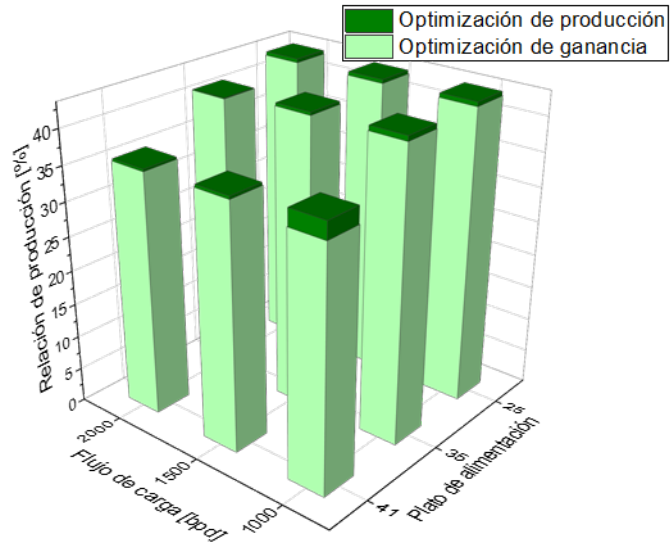
### Figura 9.

*Resultados de la optimización en función del plato de alimentación y flujo de carga.*

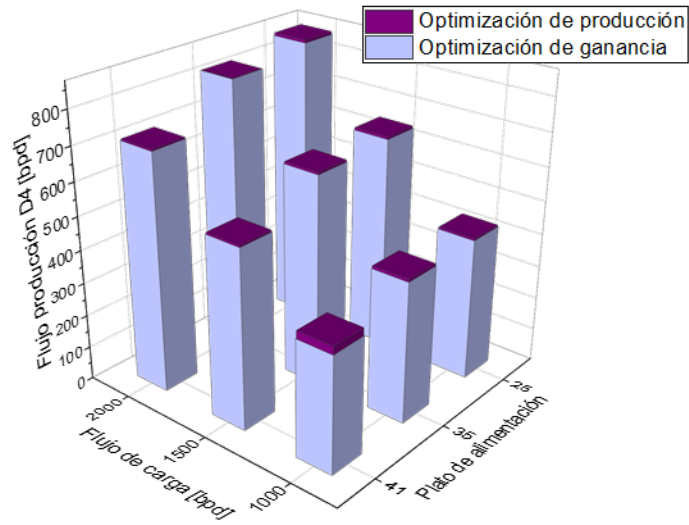
#### *a. Ganancia de la Planta Después de la Optimización*



***b. Relación de Producción Después de la Optimización***



***c. Flujo de Producción Después de la Optimización***



#### 4. Conclusiones

El análisis estadístico multivariable logró determinar que las variables del proceso que más determinan el rendimiento y la calidad del DisolventeD4 son el reflujo de cima y la temperatura del rehervidor, siendo esta última la que más restringe los parámetros de calidad, en especial, el PIE y el punto de inflamación.

Mediante el uso del simulador Aspen HYSYS se logró crear y validar con datos históricos de la planta el aplicativo que permita modelar, de forma cercana a la realidad, el funcionamiento de la torre T-651. Esto, con el fin de ser utilizado como herramienta de predicción en campo una vez se necesite cambiar las condiciones de operación, minimizando así posibles pérdidas económicas y riesgos en términos de seguridad operativa.

El estudio de sensibilidad permitió establecer el rango de temperatura del rehervidor a la cual debe operar la torre para poder cumplir con la calidad, específicamente el PIE y el punto de inflamación (como se mencionó anteriormente), siendo esta, en todos los casos, superior a 376°F. Asimismo, se evidenció que si el punto seco del alimento, en la curva de destilación, no supera los 420°F, entonces este parámetro no restringe las condiciones de operación de la torre en términos de calidad. Por otra parte, se logró determinar que el plato de alimentación que favorece una operación más versátil para la obtención de un producto en calidad, y mayor rendimiento de producción fue el plato 25.

La optimización de la operación de la torre, realizada en el simulador, estableció que las mejores condiciones para obtener una mayor ganancia del proceso se dan cuando se opera a una temperatura del rehervidor de  $377 \pm 1^\circ\text{F}$  y un reflujo aproximado del 65% del flujo de carga; mientras que, para la optimización de la producción, el simulador determinó que esta se obtiene

en mayor medida trabajando menor temperatura del rehervidor de  $375,5 \pm 0,5^\circ\text{F}$  con reflujo total, mencionando que, en ambos escenarios, el plato óptimo de alimentación es el plato 25.

## 5. Recomendaciones

Utilizar el aplicativo de la simulación cada vez que se cambie la naturaleza del alimento con el fin de determinar las condiciones óptimas de operación de la torre que permita obtener las mayores ganancias o mejores relaciones de producción, garantizando en ambos escenarios la calidad del DisolventeD4.

Mejorar las condiciones de alimentación de vapor de calentamiento en el rehervidor para optimizar la transferencia de calor y así disminuir su consumo.

### Referencias Bibliográficas

- Avellán, E. J., & Vega, N. N. (2007). Evaluación Energética en la Planta de Solventes (FENIX) Refinería ESSO Managua. In *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Cari, J. A., & Cayo, Y. (2015). *Análisis de la simulación dinámica y estacionaria para la obtención de solvente #3 a partir de la nafta pesada de la unidad de destilación primaria de una refinería de petróleo empleando el software aspen HYSYS v.8.6*. 193.
- ECOPETROL, S. . (2009). Descripción detallada del Proceso. In *Manual de procesos de la unidad U-650*.
- ECOPETROL, S. . (2020). *Catálogo de productos de ECOPETROL*. [www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co)
- Ferrada, P. J. (2009). *Sistema de entrenamiento en Operación de Plantas de Proceso “Tomando como piloto un sistema para entrenamiento en la operación de una planta de producción de Disolventes alifáticos.”*
- Garbelotto, P. (2007). *Solventes industriais : seleção, formulação, e aplicação*.
- Jaimes Figueroa, J. E., & Suárez Jaimes, M. A. (2008). *Desarrollo de un modelo de predicción de propiedades fisicoquímicas del Disolvente No. 4 producido en el GCB con base en la calidad de las naftas procesadas*. Universidad Industrial de Santander.
- Morales, X. (2013). Los Disolventes en la química verde. In *Instituto Politécnico Nacional*.
- Puello Rugeles, S. C. (2021). *Flujo de trabajo para el desarrollo comercial de campos exploratorios con potencial de crudo liviano en la cuenca de Llanos Orientales*. Universidad Industrial de Santander.
- Santafé Moros, A., & Gozálvez Zafrilla, J. M. (2016). *Análisis y simulación de procesos con Mathcad*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Torres, E., Agudelo, C., Mejía, E., Sánchez, R., Acosta, E., Acuña, A., Prada, J., & Morant, F.

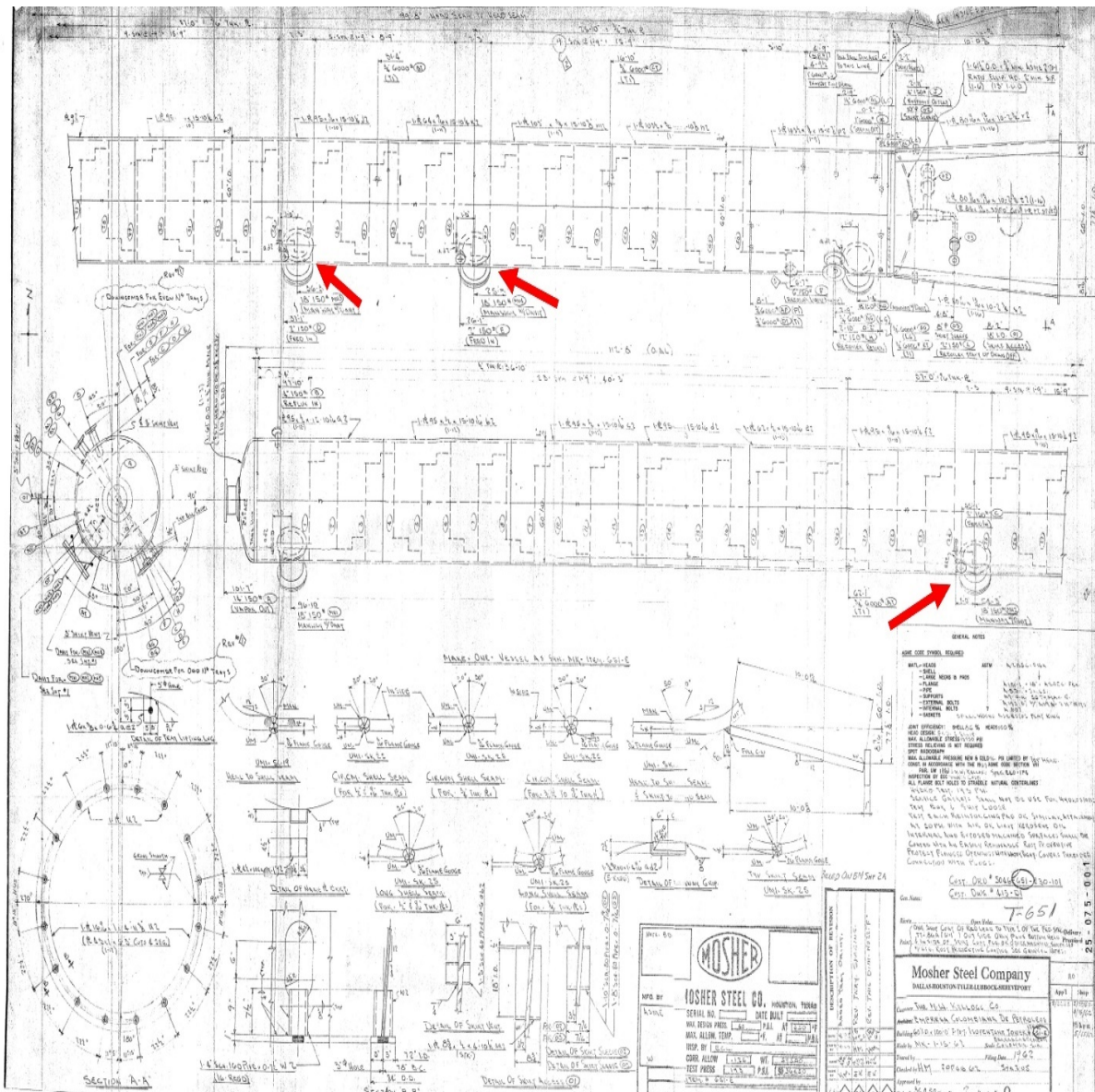
(2004). Development of an Operator Training System (OTS) for a solvent production plant at a Colombian refinery. *Technical Papers of ISA*, 454(January), 669–676.

Torres, R., & Castro, J. J. (2002). *Análisis y simulación de procesos de refinación del petróleo*.

Vega, M., Ruiz, L. A., Martínez, J., & Erdmann, E. (2015). *Diseño del proceso de una torre de vacío. Ventajas de la simulación*. 30–37.

# **Apéndices**

Apéndice A. Datasheet de la torre T-651.



Fuente: ECOPETROL S.A.

**Apéndice B.** *Curvas de destilación de la carga y datos de operación de las variables de entrada para las fechas seleccionadas del año 2020.*

| <b>FECHA</b>      | <b>PIB</b> | <b>1%</b> | <b>5%</b> | <b>10%</b> | <b>30%</b> | <b>50%</b> | <b>70%</b> | <b>90%</b> | <b>95%</b> | <b>PFB</b> |
|-------------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>24/01/2020</b> | 105,9      | 110,9     | 122,1     | 134,7      | 173,5      | 225,8      | 274,8      | 335,9      | 357,9      | 386,7      |
| <b>9/02/2020</b>  | 106,7      | 111,9     | 123,3     | 135,8      | 172,9      | 221,9      | 268,5      | 329,9      | 351,8      | 379,3      |
| <b>30/06/2020</b> | 110,7      | 110,7     | 135,5     | 152,7      | 204,1      | 252,4      | 293,0      | 343,2      | 360,6      | 383,1      |
| <b>23/07/2020</b> | 109,8      | 109,8     | 131,8     | 147,7      | 195,7      | 245,4      | 287,5      | 341,7      | 360,1      | 383,0      |
| <b>15/08/2020</b> | 111,1      | 111,1     | 134,6     | 151,0      | 199,2      | 246,5      | 286,7      | 339,4      | 358,0      | 381,1      |
| <b>29/09/2020</b> | 113,5      | 113,5     | 137,4     | 153,5      | 200,2      | 246,6      | 286,6      | 339,9      | 359,1      | 383,0      |
| <b>20/10/2020</b> | 112,4      | 112,4     | 138,6     | 156,0      | 205,6      | 250,5      | 288,6      | 339,6      | 358,0      | 381,3      |
| <b>29/11/2020</b> | 111,6      | 111,6     | 135,7     | 152,2      | 200,2      | 246,6      | 286,2      | 339,2      | 358,3      | 382,0      |
| <b>17/12/2020</b> | 112,4      | 112,4     | 138,0     | 155,3      | 205,0      | 250,4      | 288,5      | 339,0      | 357,0      | 379,8      |

Fuente: Laboratorio de hidrocarburos ECOPETROL S.A.

| <b>VALICADIÓN</b>    |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>MENSUAL EN EE</b> | <b>24/01/2020</b> | <b>9/02/2020</b> | <b>30/06/2020</b> | <b>23/07/2020</b> | <b>15/08/2020</b> | <b>29/09/2020</b> | <b>20/10/2020</b> | <b>29/11/2020</b> | <b>17/12/2020</b> |
| <b>AÑO 2020</b>      |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| FLUJO DE CARGA       | 1837,0            | 1809,7           | 1304,6            | 1147,2            | 1102,7            | 1424,8            | 1309,4            | 1540,4            | 1319,6            |
| [bpd]                |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| TEMPERATURA          | 206,9             | 202,8            | 221,5             | 205,6             | 212,8             | 204,5             | 212,3             | 214,8             | 207,5             |
| ENTRADA DE           |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| CARGA [°F]           |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| REFLUJO DE           | 952,2             | 750,1            | 698,1             | 853,9             | 753,2             | 800,4             | 654,7             | 750,2             | 729,4             |
| CIMA [bpd]           |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| TEMPERATURA          | 375,2             | 380,7            | 390,3             | 373,0             | 378,7             | 377,3             | 379,0             | 372,2             | 384,2             |
| DE SALIDA DEL        |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| REHERVIDOR [°F]      |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| PRESION DE           | 21,1              | 25,3             | 23,6              | 23,5              | 25,4              | 22,7              | 22,9              | 23,0              | 23,2              |
| CIMA [Psia]          |                   |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

Fuente: PI DATALINK ECOPETROL S.A.

Apéndice C. Gráficas de contorno del análisis de sensibilidad para 1000 y 2000 bpd de carga de alimento a diferentes platos de alimentación.

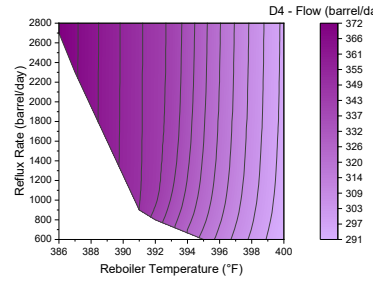
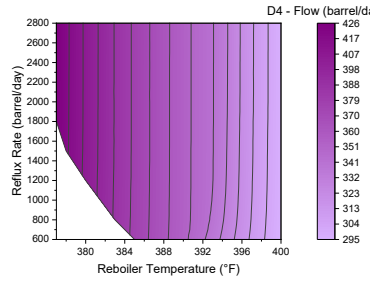
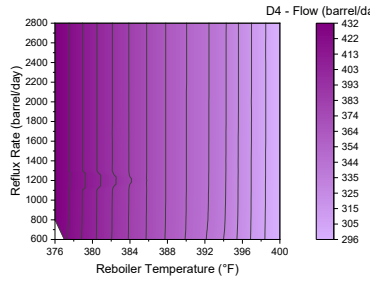
Flujo de carga = 1000 bpd

Plato de carga: 25

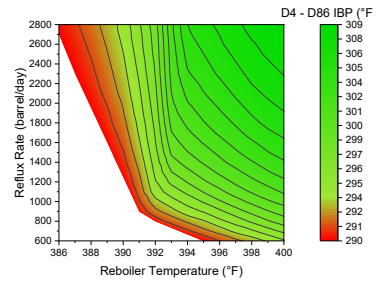
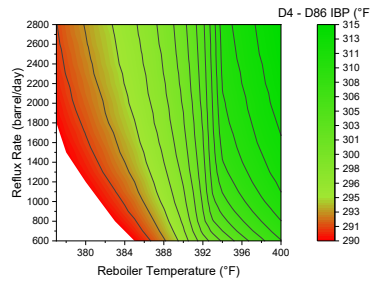
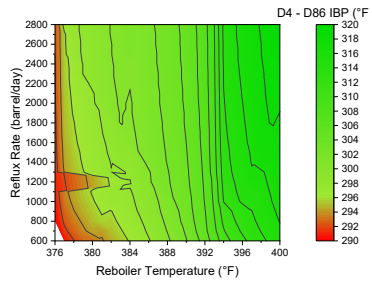
Plato de carga: 35

Plato de carga: 41

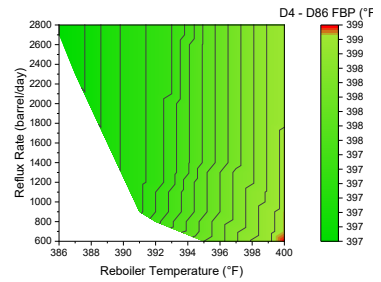
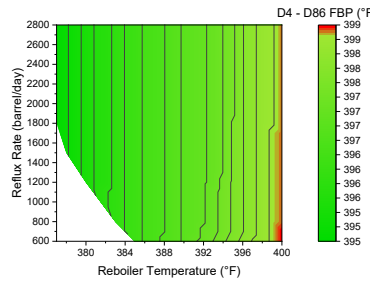
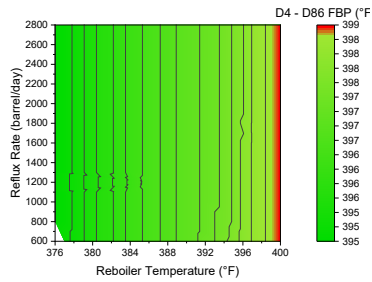
Flujo producción D4



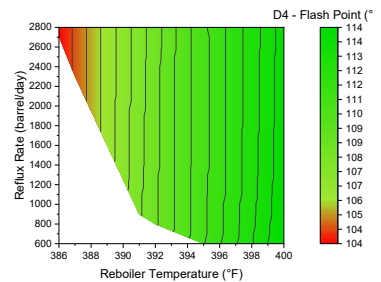
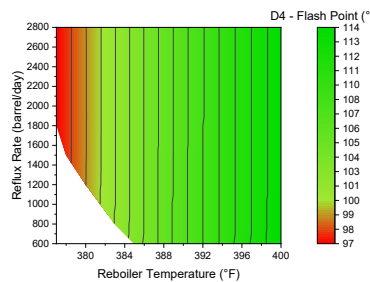
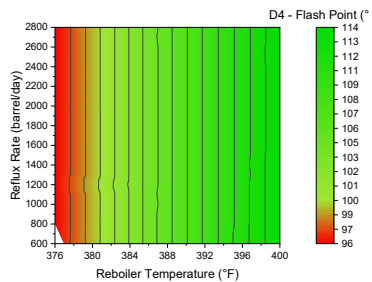
PIE



P seco



P inflamación



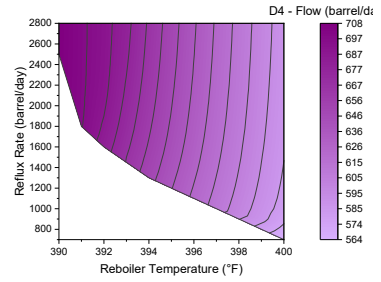
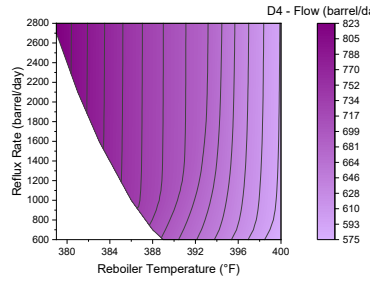
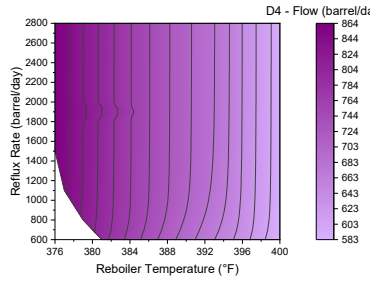
Flujo de carga = 2000 bpd

Plato de carga: 25

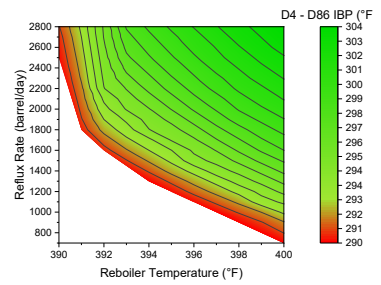
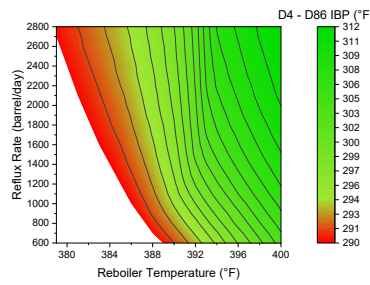
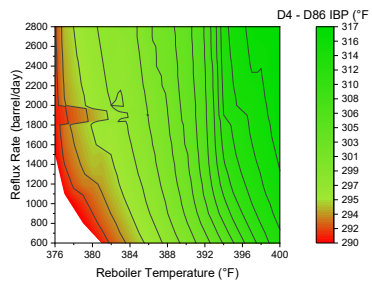
Plato de carga: 35

Plato de carga: 41

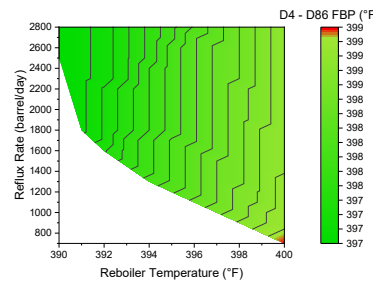
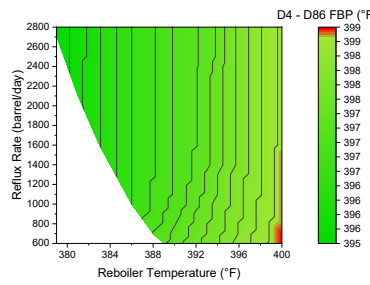
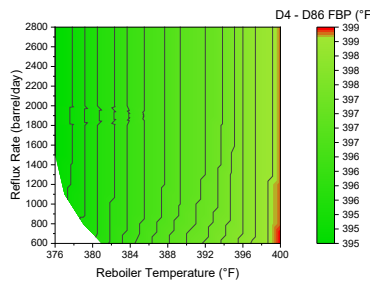
Flujo producción D4



PIE



P seco



P inflamación

